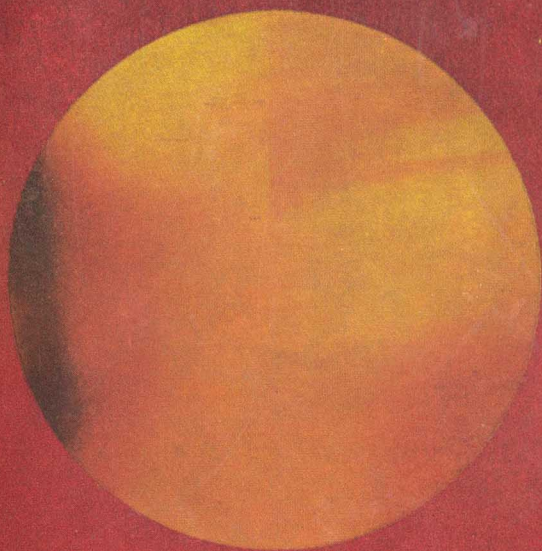




MAX BORN
FIZICA
ÎN CONCEPȚIA
GENERATIEI
MELE

DIN CUPRINSUL LUCRĂRII:

Introducere la *Teoria relativității a lui Einstein*

Mecanica cuantică și statistica

Despre importanța proceselor de ciocnire pentru înțelegerea mecanicii cuantice

Despre sensul teoriilor din fizică

Considerații filozofice cu privire la fizica modernă

Cauză, scop și economie în legile naturii (Principiile de minim ale fizicii)

Teoriile statistice ale lui Einstein

Fizică și metafizică

Situația conceptuală în fizică

Interpretarea mecanicii cuantice

Realitatea fizică

Este oare mecanica clasică într-adevăr deterministă?



Max Born.

max born

*fizica
în concepția
generației
mele*



*Editura Științifică
1969*

În românește de:
S. MORGENSTERN
L. REDLINGER

Supracoperta și coperta:
HARRY GUTTMANN

PHYSIK IM WANDEL MEINER ZEIT

von MAX BORN

Copyright by Max Born, Bad Pyrmont,
vierte, erweiterte Auflage, 1966

Porträt: Aufnahme Werner Stuhler, Hergensweiler bei Lindau

Prefață

Fizicianul Max Born s-a născut la Breslau, în anul 1882. La 23 de ani a devenit privat-docent la Universitatea din Göttingen, iar zece ani mai târziu profesor de fizică la Universitatea din orașul său natal. După primul război mondial a fost numit profesor de fizică la Universitatea din Frankfurt pe Main, iar doi ani mai târziu la Göttingen. În anul 1933 a emigrat la Calcutta, iar începând cu anul 1936 a ocupat catedra de filozofia științelor naturii la Universitatea din Edinburgh, pînă la retragerea sa la Pyrmont, în anul 1953.

Max Born a fost unul dintre fizicienii de frunte care au contribuit la promovarea marilor teorii ale secolului nostru: teoria relativității și mecanica cuantică, precum și a principalelor probleme filozofice ridicate de ele.

Prin lucrările sale privitoare la fizica relativistă nu a urmărit să contribuie la creșterea teoriei, ci la lămurirea problemelor conceptuale pe care le ridică și în special a problemelor consistenței ei, care a format decenii întregi obiectul discuției specialiștilor.

Cartea sa: *Die Einsteinsche Relativitätstheorie und ihre physikalischen Grundlagen, elementar dargestellt*, din anul 1921, cu a cărei avîntată și faimoasă prefață începe și culegerea de față, e caracteristică din acest punct de vedere.

Prin lucrările sale privitoare la dinamica rețelilor cristaline, din cel de-al doilea și din prima parte a celui de-al treilea deceniu al secolului nostru, a pus în evidență eșecul legilor mecanicii clasice în fizica atomică și nevoia de a formula altele noi, mai generale, din care cele vechi să rezulte drept aproximații valabile în domeniul macrofizic.

Lucrările sale *Dynamik der Kristallgitter* (1915); *Aufbau der Materie* (1921); *Atomtheorie des festen Zustandes* (1923); *Atommechanik* (1925) și *Probleme der Atomdynamik* (1926) sînt caracteristice pentru lămurirea progresivă a problemelor ridicate de constatarea sa că micro-obiectele fizice nu se mișcă pe traiectorii, cum presupune mecanica clasică, precum și pentru trecerea la mecanica nouă, cuantică.

Cele mai prestigioase dintre aporturile sale la progresul fizicii au fost contribuțiile fundamentale la formularea matricială a mecanicii cuantice și la dezvoltarea formulării ei ondulatorii. Ele au culminat cu interpretarea statistică a acestei mecanici, care este esențială pentru consistența ei și, împreună cu lucrările sale privitoare la rețelele cristaline, i-a adus Premiul Nobel în anul 1954, tîrziu, față de timpul și amploarea operei sale. Lucrările sale *Dynamische Gittertheorie der Kristalle*, în colaborare (1933), *Moderne Physik* (1935) și *Atomphysik* (1935) privesc toate noua fizică.

Dintre articolele sale mai importante din periodice, din perioada Edinburgh, *Die Quantenmechanik und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik* (1949) privește încă noua mecanică, însă *Meson masses and the Principle of Reciprocity* (1949) și *Elementary Particles and the Principle of Reciprocity* aduc contribuții la noua teorie a microobiectelor numite elementare, care este în curs de constituire.

Roadele muncii sale de la Edinburgh, privitoare la filosofia științelor naturii, sînt răspîndite în numeroase reviste de specialitate și în volume dedicate marilor personalități contemporane din domeniul științelor pozitive. Volumele *Natural Philosophy of Cause and Chance* (1949) și *Die begriffliche Situation in der Physik* (1954) reflectă crezul la care s-a oprit Born spre sfîrșitul vieții sale.

Prin publicarea în limba noastră a acestei culegeri de luări de poziție față de momente culminante ale revoluției răsturnătoare de idei din fizica secolului nostru s-a urmărit să se pună cititorul român în contact nemijlocit cu gîndirea unuia din cei mai reprezentativi oameni de știință din prima jumătate a acestui secol.

REMUS RADULET

Cuvînt înainte

Primele 20 de studii din această culegere constituie o retipărire, fără modificări, a edițiilor precedente; la ele se referă titlul cărții. Ele sînt menite să prezinte acele răsturnări mărețe care s-au petrecut în fizică în timpul vieții mele de cercetător și de profesor, precum și schimbarea concepției mele filozofice despre esența cunoașterii în fizică și despre importanța ei pentru omenire. Pentru a înțelege cît mai bine această schimbare, șirul studiilor a fost încadrat de două scrieri programatice: la început se află introducerea la cartea mea *Teoria relativității a lui Einstein*, din anul 1921, la sfîrșit, postfața scrisă în 1951 la ediția americană a cărții mele de popularizare *The Restless Universe*. Dacă primul reprezintă o profesiune de credință în domeniul științelor naturii, în care este afirmată și preamărită superioritatea modului obiectiv de gîndire, bazat pe fizică, asupra metodelor mai subiective de contemplare a lumii, cuvîntul de încheiere conține o apreciere filozofică total diferită. Această schimbare a fost urmarea utilizării abuzive a descoperirilor din fizică, care în cursul celui de-al doilea război mondial a culminat prin construirea și folosirea armei nucleare. Toate acestea au fost preluate în noua ediție, fără modificări. Dar trebuie să spun că edițiile noi (germană și americană) ale cărții închinată teoriei relativității nu mai cuprind acea introducere exaltată a tînărului și entuziastului cercetător al naturii, ci una mult mai cumpătată, mai apropiată de ținuta cuvîntului de încheiere la *Restless Universe*.

Prezenta reeditare conține, în afara celor de mai sus, și în continuarea lor, patru studii de dată mai recentă.

Primul, este de natură abstract-filozofică, al doilea ia în discuție problemele etice, apărute datorită utilizării abuzive a cercetării. Ultimele două studii sînt de natură autobiografică.

Îi sînt recunoscător profesorului dr. Wilhelm Westphal editorul cărții, pentru inițierea acestei ediții adăugite și pentru sfaturile date la alegerea fragmentelor noi.

Aduc mulțumiri editurii pentru că a mers în întîmpinarea dorinței mele și pentru condițiile grafice excelente în care a apărut cartea.

Bad Pyrmont, ianuarie 1966

MAX BORN

*Introducere la teoria relativității
a lui Einstein (1921)*

Lumea nu se oferă nemijlocit spiritului gînditor ; el trebuie să-și constituie imaginea ei din nenumărate senzații, întîmplări, comunicări, amintiri, experiențe. De aceea, nu există probabil nici măcar doi oameni care gîndesc, a căror imagine despre lume să coincidă întru totul.

Dacă o reprezentare devine, în trăsăturile sale cele mai importante, bunul comun al unor mase mai mari de oameni, atunci se ivesc acele mișcări spirituale care se numesc religii, școli filozofice, sisteme științifice, un haos nedescurcat de opinii, principii, convingeri. Pare absolut imposibil să găsești un fir conducător, prin care aceste percepte mult ramificate, care se separă și apoi iar se unesc, să poată fi așezate într-o ordine.

Unde își are locul teoria relativității a lui Einstein, pe care urmează să o prezinte această mică lucrare ? Este ea doar o parte specială a fizicii sau a astronomiei, interesantă poate în sine, dar fără o însemnătate mai deosebită în ce privește dezvoltarea spiritului uman ? Sau este cel puțin simbolul unei direcții spirituale caracteristice pentru epoca noastră ? Sau înseamnă chiar ea însăși o „concepție despre lume“ ? Vom putea răspunde cu certitudine la toate aceste întrebări, de-abia după ce vom fi făcut cunoștință cu conținutul teoriei lui Einstein. Aici se poate afla totuși un punct de vedere care clasifică fie și aproximativ totalitatea concepțiilor despre lume și acordă teoriei lui Einstein o anumită poziție în cadrul unei interpretări unitare date lumii în întregul ei.

Lumea este alcătuită din *Eu* și *Altul*, din lumea interioară și lumea exterioară. Relațiile dintre acești doi poli

constituie obiectul fiecărei religii, fiecărei filozofii. Dar este diferit rolul pe care-l acordă fiecare învățătură în parte *Eului* în lume. Importanța acordată *Eului* în cadru imaginii despre lume îmi apare ca o scară pe care pot fi înșirate doctrinele religioase, sistemele filozofice, concepțiile artistice și științifice despre lume, ca perlele pe un șirag. Oricît de tentant ar fi de urmărit — de-a lungul istoriei spiritului această idee, totuși nu dorim să ne îndepărtăm prea mult de tema noastră și vrem doar să aplicăm la acel domeniu al activității spirituale umane din care face parte teoria lui Einstein, adică la științele naturii.

Gîndirea științifică se află la sfîrșitul aceluia șir, acolo unde *Eul*, subiectul, nu mai joacă decît un rol neînsemnat, și fiecare pas înainte în constituirea conceptelor fizicii, astronomiei, chimiei înseamnă o apropiere de țelul eliminării *Eului*. Bineînțeles că aici nu este vorba despre actul cunoașterii, legat de subiect, ci despre tabloul încheiat al naturii, al cărui substrat este ideea după care lumea naturală există independent și neinfluențată de procesul de cunoaștere.

Porțile prin care ne invadează natura sînt simțurile. Însușirile lor determină proporțiile a ceea ce este accesibil sensibilității și intuiției. Cu cît pătrundem mai adînc în istoria științelor naturii, cu atît mai mare este dependența tabloului lumii naturale de calități senzoriale. Fizica mai veche e împărțită în mecanică, acustică, optică, teoria căldurii; se văd în mod direct legăturile cu organele de simț, cu senzațiile de mișcare, auz, lumină și căldură. Aici însușirile subiectului mai sînt decisive pentru constituirea conceptelor. Dezvoltarea științelor exacte duce în mod clar de la această situație spre un țel, pînă la atingerea căruia mai e mult, dar care stă limpede în fața ochilor: crearea unui tablou al naturii care nefiind legat de nici o limită a posibilităților de percepere sau de intuire, reprezintă un edificiu clădit numai din concepte, înălțat cu scopul redării unitare și lipsite de contradicții a sumei tuturor experiențelor.

Astăzi forța mecanică este o *abstracție*, care nu mai are comun cu senzația subiectivă de forță decît numele; masa mecanică nu mai este un atribut al corpurilor pal-

pabile, ci se atribuie și spațiilor goale umplute doar cu radiații de eter. Imperiul sunetelor perceptibile cu auzul a devenit o mică provincie în lumea vibrațiilor imperceptibile cu auzul ; el nu se deosebește fizicește de acestea prin nimic, în afară de însușirea întâmplătoare a urechii omenеști de a reacționa direct numai la un anumit interval al frecvențelor. Optica de astăzi este un capitol special din teoria electricității și magnetismului, care se ocupă cu vibrațiile electromagnetice de toate lungimile de undă, de la cele mai scurte radiații γ ale substanțelor radioactive (cu lungimea de undă egală cu a o sută milionime parte dintr-un milimetru), prin radiațiile röntgen, ultraviolete, lumina vizibilă, ultraroșul, pînă la cele mai lungi unde *hertziene* (cu lungimea de undă de mulți kilometri). În fluxul luminii invizibile, care oscilează în jurul ochiului spiritual al fizicianului, ochiul corporal este aproape orb, atît de mică este zona vibrațiilor, care îi este perceptibilă. Și teoria căldurii este numai o anumită parte a mecanicii și a electrodinamicii ; conceptele sale fundamentale — temperatura absolută, energia și entropia — fac parte dintre construcțiile logice cele mai subtile ale științelor exacte și mai amintesc doar cu numele de senzațiile de căldură și de frig ale subiectului.

Sunetele care nu se aud, lumina care nu se vede, căldura care nu se simte — aceasta este lumea fizicii, rece și moartă pentru cei care vor să perceapă natura vie, să recepționeze armonia conexiunilor sale și să admire cu adorație măreția sa. Goethe a detestat această lume încremenită ; polemica sa înverșunată împotriva lui Newton, în care el vedea întruparea unei concepții dușmănoase despre natură, dovedește că aici e vorba de mai mult decît de o dispută obiectivă între doi cercetători cu privire la amănuntele teoriei culorilor. Goethe este reprezentantul acelei interpretări a lumii, care în ordinea schițată mai sus, după criteriul importanței pe care o acordăm *Eului*, stă cam la capătul opus tabloului despre lume al științelor naturii. Esența artei poetice este inspirația, intuiția, sesizarea vizionară a lumii sensibile în forme simbolice ; dar izvorul forței poetice este trăirea, fie perceperea conștientă, luminoasă și clară a unei excitații senzuale, fie ideea puternic redată a unei conexiuni. Elementul logic formal,

conceptual, nu joacă nici un rol în tabloul pe care și-l face despre lume un spirit dotat sau chiar inspirat în acest fel ; lumea, ca sumă a abstracțiilor, care sînt legate doar indirect cu cele trăite, îi este străină. Numai ceea ce îi este dat în mod nemijlocit, ceea ce este simțit ca un eveniment trăit sau poate fi măcar reprezentat ca un eveniment posibil este adevărat și important pentru el. Astfel, cititorului de mai târziu, care a cuprins cu privirea dezvoltarea metodelor exacte din secolul următor și care măsoară forța și sensul lor după roadele pe care le-au dat operele de istoria naturii ale lui Goethe îi apar ca documente ale unui spirit vizionar, ca expresia unei pătrunderi minunate în conexiunile naturale ; în schimb, afirmațiile sale de domeniul fizicii — ca aprecieri greșite și ca o răzvrătire nefructuoasă împotriva unei forțe mai puternice, a cărei victorie era deja decisă.

În ce constă această forță, care sînt armele sale ?

Este în același timp o pretenție arogantă și o renunțare. Științele exacte au pus problema unor afirmații obiective, dar au renunțat la valabilitatea lor absolută. Prin această formulă, urma să fie scoasă în evidență următoarea contradicție.

Toate trăirile nemijlocite duc la afirmații, cărora trebuie să li se recunoască o anumită valabilitate absolută. Dacă văd o floare roșie, dacă simt plăcerea sau durerea, acestea sînt date asupra cărora n-are rost să te îndoiești. Ele au o valabilitate de netăgăduit, dar ele sînt valabile numai pentru mine, ele sînt absolute, dar subiective. Orice năzuință spre cunoașterea umană tinde să iasă din cercul strîmt al *Eului*, din și mai strîmtul *Eu* al momentului, spre o comunitate cu alte ființe spirituale : mai întîi cu *Eul* din alte epoci, apoi cu alți oameni sau zei. Toate religiile, filozofiile, științele sînt procedee inventate cu scopul de a extinde pe *Eu* la *Noi*. Dar căile care servesc acestui scop sînt diferite, ne aflăm iarăși în fața haosului părerilor doctrinare care se înfruntă. Dar noi nu mai dăm îndărăt din fața lor, ci le ordonăm după importanța pe care o acordă subiectului diferitele căi de a ajunge la înțelegerea spre care năzuim ; cu aceasta revenim la principiul nostru, deoarece prelucrarea realizată în vederea

Înțelegerii reciproce este concepția despre lume. Aici ies iarăși la iveală polii opuși.

Unii nu vor să renunțe, nu vor să jertfească absolutul, rămân de aceea prizonierii *Eului* și creează un tablou al lumii care nu poate fi trezit în suflete străine prin nici un procedeu sistematic, ci prin influența insesizabilă a mijloacelor de exprimare religioasă, artistică, poetică. Aici domnește credința, ardoarea evlavioasă, dragostea pentru comunitatea frățească, dar adesea și fanatismul, intoleranța, constrângerea spirituală.

Ceilalți jertfesc absolutul. Ei descoperă — adesea cu înfiorare — netransmisibilitatea trăirii sufletești, ei nu mai luptă pentru inaccesibil, și se resemnează. Dar ei vor să realizeze o înțelegere cel puțin în sfera accesibilului. De aceea, ei caută elementul comun la *Eu* și la celălalt *Eu*, cel străin ; cel mai bun lucru ce s-a găsit aici nu sînt trăirile sufletului însuși, nu sînt senzațiile, reprezentările și sentimentele, ci conceptele abstracte cele mai simple, numerele, formele logice, pe scurt, mijloacele de exprimare ale științelor exacte. Aici nu mai este vorba despre absolut. Înălțimea unui dom nu mai e percepută în mod solemn, ci măsurată în metri și centimetri. Durata unei vieți nu este simțită ca timp care curge, ci este socotită în zile și ani. Măsuri relative iau locul impresiilor absolute. Rezultă o lume strîmtă, unilaterală, cu muchii ascuțite, lipsită de orice excitare a simțurilor, de orice culoare și tonuri ; dar are un avantaj față de celelalte tablouri ale lumii : comunicarea sa de la spirit la spirit nu poate fi pusă sub semnul îndoielii, pentru că se poate conveni tocmai asupra unor asemenea fapte : dacă fierul are o greutate specifică mai mare decît lemnul, dacă apa îngheață mai ușor decît argintul viu, dacă Sirius este o planetă sau o stea fixă. E posibil să apară dispute, poate să pară uneori că o nouă teorie aruncă peste bord toate „faptele” vechi. Totuși, cel care nu s-a temut de oboseala pătrunderii înăuntrul acestei lumi simte cum cresc domeniile certitudinilor, și acest sentiment alungă chinul singurătății spirituale și clădește puntea spre spiritele înrudite.

Am încercat să exprimăm în acest fel esența cercetării în domeniul științelor naturii, și acum putem stabili locul teoriei relativității a lui Einstein.

Ea este înainte de toate un produs pur al acelei năzuințe de eliberare de *Eu*, de senzație, de intuiție. Am vorbit despre sunetele care nu se aud și lumina care nu se vede, ale fizicii ; ceva asemănător găsim în științele învecinate : în chimie, unde se afirmă existența unor substanțe (radioactive), cu toate că nici cea mai mică urmă a lor n-a fost încă percepută de cineva direct, prin vreun simț oarecare, sau în astronomie, de care ne vom ocupa mai îndeaproape în cele ce urmează. Aceste „lărgiri ale lumii“, după cum s-ar putea spune, se referă în esență la calități senzoriale ; dar totul se petrece în acel spațiu și în acel timp pe care mecanica le-a primit în dar din partea întemeietorului ei Newton. Einstein a descoperit tocmai faptul că acel spațiu și acel timp mai erau legate cu totul și cu totul de *Eu* și că tabloul științelor naturii despre lume devine mai frumos și mai măreț, atunci când și aceste noțiuni fundamentale sînt supuse relativizării. Dacă înainte spațiul era strîns legat de senzația subiectivă, absolută, a întinderii, iar timpul — de durata vieții, ele devin acum scheme pur conceptuale la fel de sustrate contemplării nemijlocite în întregul ei, după cum opticii actuale îi este inaccesibil întregul domeniu al lungimilor de undă, cu excepția sectorului infim al senzației de lumină ; dar la fel ca în acest caz, spațiul și timpul intuitiv se integrează fără contradicții în sistemul conceptual al fizicii. În acest fel, s-a ajuns la o obiectivare, a cărei putere s-a verificat în mod uimitor prin precizarea profetică a unor fenomene din natură.

Contribuția teoriei lui Einstein este deci relativizarea și obiectivarea noțiunilor de spațiu și timp. Ea încoronează astăzi edificiul imaginii despre lume oferit de științele naturii.

Descoperirea legilor numerice pentru liniile spectrale este una dintre rădăcinile din care a crescut mecanica cuantică. Carl Runge a fost unul din primii care au recunoscut însemnătatea regularității descoperite de Balmer în spectrul hidrogenului și a început să caute serii asemănătoare la alte elemente. Marele succes, pe care l-a obținut în cursul acestor cercetări, l-a ridicat în rîndul cercetătorilor care au creat bazele experimentale ale teoriei cuantelor. Și noua mecanică cuantică este un vlăstar al acestei dezvoltări; unul din suporturile sale principale este principiul combinatoriu al liniilor spectrale. Prin urmare, pare justificat să prezentăm, în acest volum închinat lui Runge, cîteva considerații cu privire la mecanica cuantică. În nici un caz, nu vom prezenta o dare de seamă asupra situației din mecanica cuantică; o asemenea dare de seamă a fost publicată recent, în această revistă, de către întemeietorul noii teorii, și singura ei lipsă constă în faptul că numele lui Heisenberg nu figurează în enumerarea cercetătorilor care au contribuit la ea. Este mai curînd o încercare de a înțelege sensul noului formalism.

Deocamdată, avem în fața noastră în primul rînd un formalism de o productivitate și o suplețe și mai surprinzătoare, și anume, ceea ce trebuie subliniat, un formalism unic, deoarece din punct de vedere matematic diferitele algoritme (teoria matriceală, analiza necomutativă a lui Dirac și ecuațiile cu derivate parțiale ale lui Schrödinger) sînt echivalente. S-a realizat calculul pozițiilor staționare

* „Științele naturii“, 15 (1927), Caietul Carl-Runge, p. 238.

ale atomului și al radiațiilor determinate de ele (neglijînd reacția radiației asupra atomului, amortizarea); pare că aici nu ne mai rămîne nimic de dorit, avînd în vedere că fiecare exemplu nou, calculat pînă la capăt, concordă cu experiența.

Dar chestiunea cu privire la stările posibile ale materiei nu epuizează nici pe departe sfera problemelor fizicii. Cel puțin la fel de importantă, dacă nu mai importantă, este chestiunea modului cum decurg procesele care intervin în cazurile de răsturnare a stării de echilibru. Fizica clasică se concentra mai cu seamă asupra acestei ultime chestiuni, deoarece nu prea putea să rezolve problema structurii. Invers, mecanica cuantică a ocolit pînă acum aproape cu desăvîrșire problema dezvoltării fenomenelor; pentru aceasta nu a putut fi adaptată pur și simplu formalismului. Aici ne vom ocupa cu unele încercări de a trata problema dezvoltării fenomenelor cu ajutorul mecanicii cuantice.

În dinamica clasică este valabil în mod nelimitat principiul, după care cunoașterea stării (adică a poziției și vitezei tuturor particulelor de materie), la un moment dat, determină evoluția unui sistem închis o dată pentru totdeauna; aceasta este accepția pe care o ia raportul cauzal în fizică.

Aceasta se exprimă matematic prin faptul că mărimile fizice satisfac ecuații diferențiale de un anumit tip. Dar alături de această legitate cauzală, metoda statistică a avut întotdeauna un rol de jucat. E drept că apariția probabilităților se justifică de obicei prin faptul că starea inițială nu este niciodată cunoscută cu exactitate; întrucît aceasta nu se obține, se va face uz, oarecum provizoriu, tocmai de statistică.

Calculul elementar al probabilităților pornește de la ipoteza că există temeiul de a privi anumite cazuri ca egal-probabile și deduce de aici probabilitatea unor combinații complicate; sau, mai general: fiind dată o distribuție acceptată (de exemplu cea uniformă, „cazuri egal-probabile”), se deduce o altă distribuție, dependentă de ea. Evident, este deosebit de important cazul cînd distribuția derivată se dovedește total sau parțial independentă de cea inițial acceptată.

În mod corespunzător procedează și fizica : ca trebuie să facă o presupunere cu privire la o distribuție inițială, pe cât posibil cu cazuri egal-probabile, și trebuie să se străduiască să arate că pînă la urmă alegerea distribuției inițiale nu influențează rezultatele stabilite prin observație.

Ambele etape le putem vedea în mecanica statistică unde se procedează la împărțirea spațiului fazelor în celule egal-probabile, utilizînd numai cîteva principii mecanice generale (principiul conservării energiei, teorema lui Liouville) ; dar pe lîngă aceasta, se depun strădanii pentru transformarea acestei statistici a „spațiului total“ într-o statistică a „timpului total“, cu scopul de a înlătura arbitrarul diviziunii în celule. Dar ipoteza ergodică, care servește în acest scop și care afirmă că în cursul timpului fiecare sistem parcurge în mod spontan la fel de des toate celulele, nu este decît o ipoteză, și așa va rămîne probabil. De aceea, se pare că justificarea alegerii cazurilor egal-probabile prin diviziunea celulară a spațiului fazelor poate fi obținută numai aposteriori pe baza succesului în ce privește interpretarea cu ajutorul ei a proceselor din natură.

La fel se întîmplă peste tot cînd se utilizează în fizică considerente probabilistice. Să examinăm, de pildă, șocurile atomare, de exemplu ciocnirea dintre electron și un atom. Dacă energia cinetică a ciocnirii este mai mică decît prima energie de impuls a atomului, atunci ciocnirea se petrece „elastic“, adică fără pierdere de energie. În acest caz, poate fi pusă întrebarea, în ce direcție a deviat electronul prin ciocnire ? Teoria clasică consideră fiecare asemenea ciocnire în parte ca fiind cauzal determinată ; dacă ar fi cunoscute toate pozițiile și vitezele exacte ale tuturor electronilor din atom și ale electronului care se ciocnește la un moment dat, atunci devierea acestuia din urmă ar putea fi calculată în mod exact dinainte. Numai că nouă ne lipsește, din păcate, în prezent această cunoaștere a microconfigurației ; de aceea, trebuie să ne mulțumim iarăși cu valori medii. În acest scop, trebuie, ceea ce nu se subînțiază de obicei, să facem o presupunere cu privire la configurațiile egal-probabile ; acest lucru se întîmplă în modul cel mai „natural“ posibil, întrucît se introduc fragmente de determinare a poziției relative a traiectoriei electronilor față de centrul atomului precum și anumite varia-

bile de unghi sau faze de mișcare acceptându-se că intervalele lor egale sînt și egal-probabile. Dar aceasta nu este decît o ipoteză, care poate fi justificată numai prin succesul ei.

Particularitatea acestui procedeu constă în faptul că introducerea microcoordonatelor are loc numai pentru a salva, cel puțin în principiu, caracterul determinant al fiecărui proces în parte. Căci în practică, trebuie să renunțăm la el : experimentatorul numără numai particulele deviate într-o anumită direcție, fără a se sinchisi de detaliile traiectoriei ; chiar și porțiunea esențială a traiectoriei, de-a lungul căreia are loc interacțiunea cu atomul, este inaccesibilă observației. Totuși, din asemenea date numerice se pot trage concluzii retrospective cu privire la mecanismul ciocnirii. Un exemplu vestit în această privință îl oferă observațiile lui Rutherford asupra radiațiilor α , unde însă nu sînt luate în considerație fazele mișcării atomului ca microcoordonate, ci numai distanța dintre nucleul atomic și traiectoria inițială a particulelor α . Rutherford a putut să dovedească prin statistica radiației valabilitatea legii lui Coulomb cu privire la interacțiunea dintre particulele α și nucleul atomic lovit. Din formula utilizată cu acest prilej cu privire la numărul particulelor deviate într-o anumită direcție este eliminată microcoordonata (distanța la traiectorie).

Avem așadar în față un caz, în care cîmpul de forțe este estimat prin metode statistice și nu prin observarea unei accelerații conforme cu legea fundamentală a lui Newton.

Metoda nu este în fond diferită de aceea întîlnită la aruncarea zarurilor, cînd se trezește bănuiala că un zar ar fi „fals“, pentru că un număr apare timp îndelungat mult mai frecvent decît într-o șesime a cazurilor : metodele statistice arată totuși prezența unui moment de rotație.

Un alt exemplu ni-l oferă „formula barometrului“. Desigur, ea poate fi dedusă în mod dinamic dacă privim aerul ca un *continuu* și considerăm dat echilibrul dintre presiunea hidrodinamică și forța gravitației ; dar de fapt, presiunea e definită numai statistic, ca transportul mediu al impulsului prin ciocnirea moleculelor, și de aceea aceasta nu numai că justifică, dar și explică mai profund de ce

Formula barometrului trebuie considerată ca o numărătoare a moleculelor în câmpul gravitațional, din care pot fi deduse legile acestui câmp.

Aceste considerații ne conduc la ideea că definiția newtoniană a forței poate fi înlocuită cu una statistică. După cum în mecanica clasică mișcarea de inerție a unei particule indică absența unei forțe, aici ea indică distribuția uniformă și spațială a mulțimii particulelor (alegerea coordonatelor convenabile conduce în ambele teorii la probleme asemănătoare). După cum acolo mărimea unei forțe se măsoară prin accelerația unei particule, tot astfel aici — prin neuniformitatea distribuției unei mulțimi de particule.

În teoria clasică apare, firește, problema reducerii celor două definiții ale forței la una singură și în această direcție tind toate strădaniile de justificare rațională a mecanicii statistice; noi însă am încercat să lămurim că acest lucru n-a reușit pe deplin, pentru că la urma urmelor alegerea „cazurilor egal-probabile“ nu poate fi evitată.

După această pregătire, să ne îndreptăm privirea spre mecanica cuantică. Este bător la ochi faptul că aici chiar istoricește conceptul de probabilitate apriorică a luat un rol, care nu poate fi redus la cel al cazurilor egal-probabile, ca de exemplu la „probabilitățile de trecere“ la procesele de emisie. Dar s-ar putea ca aceasta să se datoreze numai imperfecțiunii teoriei.

Mai important este faptul că în cadrul formalismului mecanicii cuantice nu se poate stabili exact poziția particulelor în spațiu și timp. Bineînțeles că s-ar putea obiecta că după Schrödinger, particulele nu pot avea nici un fel de locuri precis definite, pentru că nu sînt decît grupe de unde sau pachete de unde cu contururi difuze; dar eu aş vrea să las aici la o parte această imagine a pachetelor de undă, pentru că ea n-a fost dezvoltată mai departe și probabil că nici nu poate fi. Căci undele lui Schrödinger nu se mișcă în spațiul obișnuit, ci în „Spațiul fazelor“, care are tot atîtea dimensiuni cîte grade de libertate comportă sistemul luat în considerație ($3N$ dimensiuni pentru N particule). Descrierea sistemelor, făcută în cadrul teoriei cuantelor, conține anumite enunțuri cu privire la energia im-

pulsului și la impulsul rotațional al sistemului ; dar la în-
trebarea „unde se află o anumită particulă la momentu-
dat ?“ ea răspunde cel mult în cazurile de graniță în car-
mecanica cuantică trece în mecanica clasică. Astfel însă
noua teorie este în mai bună concordanță cu procedeele
experimentatorilor, căroro microcoordonatele le sînt fires-
inaccesibile și care, de aceea, se mărginesc să numere ca-
zuri și să facă apel la statistică. Aceasta ne apropie d-
ideea că și mecanica cuantică răspunde numai la întrebă-
rile statistice corecte, și lasă în genere fără răspuns între-
barea asupra mersului proceselor individuale. Ea ar con-
stitui deci o contopire specifică a mecanicii cu statistica

Potrivit cu aceasta, ecuațiile diferențiale ale mecanicii
ondulatorii ar putea fi reprezentate intuitiv cam astfel
procesul ondulatoriu care se propagă în conformitate c-
aceste ecuații nu reprezintă în nici un caz în mod direc-
mișcarea materiei, ci precizează doar mișcările posibile sa-
mai bine zis „stările“ materiei. Materia însăși poate fi re-
prezentată, acum ca și mai înainte, prin imaginea uno-
particule (electroni, protoni) mobile (punctiforme) ; numa-
că în multe cazuri aceste corpuscule nu pot fi de loc iden-
tificate ca indivizi, de exemplu atunci cînd se unesc în
sisteme atomice. Un asemenea sistem de atomi posedă un
șir discret de „stări“, dar există și domenii continue d-
stări care posedă proprietatea remarcabilă că într-o ase-
menea stare perturbarea se propagă întotdeauna de-a lun-
gul unei orbite a atomului cu o viteză finită, ca și cum
s-ar fi catapultat o particulă. Acest fapt este cel care în-
dreptățește reprezentarea corpusculară, ba chiar o pă-
trunde, cu toate că în anumite cazuri, după cum am ma-
spus, acest lucru nu trebuie luat *ad litteram*. Între corpus-
cule există forțe electromagnetice (facem deocamdată abs-
tracție de viteza finită a propagării lor) ; după cum știm
ele sînt date prin legile valabile în electrodinamica clasică
ca funcții ale coordonatelor particulelor (de exemplu
atrakția *coulombiană*). Dar aceste forțe nu sînt proporțio-
nale cu accelerația particulelor, ca în teoria clasică, n-a-
cîtuși de puțin vreo legătură directă cu mișcarea particu-
lelor. Ba, mai degrabă intervine cîmpul ondulatoriu : for-
țele determină oscilațiile unei anumite funcții de stare
care depinde de poziția simultană a tuturor particulelor

(deci este o funcție în „spațiul fazelor“), și anume astfel încât ψ satisface o ecuație diferențială ai cărei coeficienți depind de forțe.

Cunoașterea funcției ψ ne permite acum să calculăm tendința de desfășurare a unui proces fizic, în măsura în care el poate fi determinat prin legile mecanicii cuantice : adică nu în sensul determinismului cauzal, ci în sensul probabilității. Fiecare procedeu constă din procese elementare, pe care le numim de obicei treceri sau salturi ; iar aceste procese elementare, ca atare, se pare că nu se supun descrierii intuitive spațio-temporale, putându-se determina numai rezultatele lor finale. Rezultatul final constă tocmai în aceea că sistemul se află la sfârșit în altă stare cuantică decât la început. Determinarea acestor treceri prin intermediul funcției ψ are loc după cum urmează : fiecărei stări a atomului îi corespunde o anumită stare de oscilație, adică o anumită soluție caracteristică sau „funcție proprie“ a ecuației de undă ; de exemplu, stării normale — funcția ψ_1 , stării următoare — ψ_2 ș.a.m.d. Spre a simplifica lucrurile, să admitem că sistemul se află în starea normală ψ_1 . Dacă acum apare un proces elementar, atunci această rezolvare se transformă, după modul cum decurg cauzele procesului, într-o alta, de forma

$$\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2 + c_3 \Psi_3 + \dots$$

care reprezintă o suprapunere a unui număr de „funcții proprii“, cu amplitudini parțiale bine determinate $c_1, c_2, \dots$. Atunci pătratele acestor amplitudini, adică mărimile

$$c_1^2, c_2^2, c_3^2,$$

dau probabilitățile, pentru ca la sfârșit sistemul să se afle în starea 1., 2., 3., ..., adică, de exemplu, c_1^2 , este probabilitatea de trecere în cea de-a doua stare ș.a.m.d.¹. Aceste

¹ Poate că nu este de prisos să scoatem în evidență deosebirea dintre interpretarea propusă aici, și cunoscuta teorie statistică a luminii a lui Bohr, Kramers și Slater. Acolo se renunță la legile conservării pentru energie și impuls, ele fiind admise numai în medie. Aici, însă, legile de conservare se exprimă prin formalismul mecanicii cuantice ; statistica se referă numai la mărimi, ca direcțiile de deviere la ciocnire, ale căror analoguri nu sînt „cuantificabile“ în teoria lui Bohr (variabile de unghi).

probabilități sînt determinate deci prin mecanism. Dar nu este determinat ceea ce face de fapt sistemul observat în fiecare caz în parte, cel puțin nu în cadrul legii astăzi cunoscută. Ceea ce nu constituie însă nimic nou ; căci, după cum am explicat mai sus, de exemplu în legătură cu legile ciocnirilor, în fapt nici teoria clasică nu oferă decît probabilități în cazul proceselor atomice. Numai că teoria clasică introduce mai întîi microcoordonate care determină procesul, pentru a le elimina apoi datorită necunoașterii valorilor, cu ajutorul mediilor, în timp ce noua teorie se descurcă și fără aceste microcoordonate, și ajunge totuși la rezultate corespunzătoare. Și apoi, nu este bineînțeles nimănui interzis să creadă în existența microcoordonatelor ; dar ele vor dobîndi o importanță pentru fizică de-abia atunci cînd se vor stabili metode pentru determinarea lor experimentală. Aici nu este însă locul să insistăm asupra implicațiilor filozofice legate de această problemă ; ne vom mîrgini la schițarea punctului de vedere pe care ni-l impune întregul context al experimentelor fizice. I se retrage forței menirea sa clasică, de a determina în mod direct mișcări, și i se atribuie noua sarcină, de a determina probabilitățile stărilor. Dar în timp ce înainte vreme se încerca să se pună în concordanță aceste două lucruri și să se deducă o definiție a forței din cealaltă, acum, riguros vorbind, aceasta nu mai are vreun sens : rămîne doar întrebarea, cum de a fost posibilă pentru o clasă atît de mare de fenomene definiția clasică a forței ? Răspunsul sună, ca întotdeauna în cazurile de acest fel : „pentru că teoria clasică este un caz-limită al noii teorii“. Și anume, în fond este vorba despre așa-numitul caz-limită „adiabatic“, adică despre cazul în care influența exercitată din exterior (sau chiar interacțiunea dintre părțile sistemului) are loc extrem de încet. Rezultă atunci, cu o mare aproximație, că :

$$c_1^2 = 1, c_2^2 = 0, c_3^2 = 0, \dots$$

adică faptul că nu există nici o probabilitate pentru un salt, ci că sistemul se află, după încetarea procesului, din nou în starea inițială. O asemenea influențare înceată este deci „reversibilă“, ca în teoria clasică. Acest lucru poate fi generalizat și pentru cazul în care sistemul se află la sfîrșit în alte condiții decît la început ; atunci starea e schimbată

„adiabatic“, fără să fi avut loc un salt. Acesta este cazul-limită, singurul de care s-a ocupat mecanica clasică.

Chestiunea dacă aceste concepții se confirmă peste tot este desigur încă deschisă. Cu ajutorul lor, procesele de ciocnire au putut căpăta o formulare în cadrul mecanicii cuantice, iar rezultatul concordă calitativ pe deplin cu experiența. Astfel, s-a obținut o interpretare precisă tocmai pentru observațiile care pot fi considerate ca dovada cea mai nemijlocită a structurii cuantice a energiei: treptele discontinue de energie (potențialele de impuls), care au fost găsite pentru prima dată de Franck și Hertz. Apariția bruscă a stărilor de impuls la creșterea vitezei electronului care se ciocnește este o consecință directă a teoriei. În plus, ea dă formule pentru distribuția electronilor după diferite unghiuri de deviere, iar aceste formule se abat în mod caracteristic de la rezultatele la care ne-am aștepta după teoria clasică. Acest fapt fusese observat de Elsasser [1] încă înainte de dezvoltarea teoriei generale. El a pornit de la ideea lui De Broglie, după care mișcarea particulelor este însoțită de unde, a căror frecvență și lungime de undă sînt determinate prin energie și impulsul particulelor. Elsasser a calculat lungimile de undă pentru electronii încetiși și le-a găsit o mărime de ordinul 10^{-8} cm, ceea ce cade exact în cadrul dimensiunilor atomice. De aici, el a conchis că ciocnirea unui electron cu un atom, trebuie să dea loc la o difracție a undelor lui De Broglie, cu totul analogă cu fenomenul cunoscut al împrăstierii luminii în particule mici. Fluctuația intensităților undei în diferite direcții ar corespunde atunci neregularității distribuției electronilor deviați. Indicații cu privire la un asemenea efect dau experimentele lui Davisson și Kunsman [2] asupra reflectării electronilor de către suprafețele metalice. Această ipoteză îndrăzneată a fost pe deplin confirmată de Dymond [3] prin măsurarea distribuției electronilor după ciocnirea cu un atom de heliu.

Din păcate, situația momentană a mecanicii cuantice permite doar o descriere calitativă a acestui fenomen; pentru o prelucrare completă ar fi necesară rezolvarea deplină a problemei structurii heliului. De aceea, este deosebit de importantă aplicarea teoriei la experimentele mai sus amintite ale lui Rutherford și ale colaboratorilor săi cu privire

la împrăștierea radiațiilor α ; căci, în acest caz avem de-a face cu un mecanism simplu și pe deplin cunoscut, al devierii reciproce a două particule încărcate.

Formula clasică, pe care Rutherford a dedus-o din observarea orbitei hiperbolice a particulelor, a fost confirmată experimental în mare măsură ; dar de curînd, Bieler [4], Rutherford și Chadwick [5] au găsit abateri de la această lege cu ocazia ciocnirii unor particule α cu atomi ușori, iar Blackett, care studiază acum în mod amănunțit acest fenomen, a încercat să explice și aceste abateri prin difracția undelor De Broglie. În momentul de față, a fost dat răspunsul numai la chestiunea prealabilă, dacă formula clasică a lui Rutherford poate fi dedusă ca un caz-limită din mecanica cuantică. G. Wentzel [6] a arătat că lucrurile stau într-adevăr astfel. Autorul prezentei comunicări [7] a dus în continuare pînă la capăt calculul ciocnirii unei particule încărcate cu un atom de hidrogen și a obținut formula, care reprezintă totodată ciocnirile unor particule de orice energie (de la electronii înceti, pînă la particulele α de mare viteză). Pînă acum a fost dezvoltată numai prima aproximație, care nu descrie încă efectele de difracție mai fine ; se obține o expresie care înglobează în domeniul vitezelor studiate de Lenard, lucruri atît de diferite ca legea lui Rutherford de împrăștiere a radiațiilor α și secțiunea efectivă a atomilor de hidrogen pentru electronii care se ciocnesc între ei. Aceeași metodă duce la o calculare a probabilității de impulsionare a unor atomi H prin șocuri de electroni ; aceste calcule nu au fost încă pe deplin încheiate.

Dar chiar dacă se vor confirma și în continuare ideile prezentate aici, aceasta nu înseamnă că ele ar fi oarecum definitive. Se poate spune de pe acum că ele se leagă încă prea mult de conceptele uzuale de spațiu și timp. Formalismul mecanicii cuantice este în orice caz mult mai suplu și permite interpretări cu mult mai generale. Așa, de pildă, coordonatele și impulsurile particulelor pot fi unificate prin așa-numitele „transformări canonice“, ajungîndu-se astfel la cu totul alte sisteme, cu formule total diferite, cu alte funcții de undă. Însă ideea fundamentală, că e vorba despre „unde de probabilitate“, va rămîne desigur în picioare, într-o formă sau alta.

Bibliografie

- [1] W. Elsasser, in „Naturwissenschaften“ **13** (1925), p. 711.
- [2] Davisson, Kunsman, in „Phys. Rev.“, **22** (1923), p. 243.
- [3] E. G. Dymond, in „Nature“ **118** (1926), p. 336.
- [4] E. S. Bieler, in „Proc of the Roy. Soc. of London“ Ser. B., **105** (1924), p. 434.
- [5] E. Rutherford, J. Chadwick, in „Phil. Mag.“ **50** (1925), p. 889.
- [6] G. Wentzel, in „Zeitschr. f. Physik“, **40** (1926), p. 590.
- [7] M. Born, in „Gött. Nachr.“, 1926, p. 146.

3

*Despre importanța proceselor de ciocnire pentru înțelegerea mecanicii cuantice**

Mecanica cuantică în forma sa matriceală inițială, așa cum a fost stabilită de Heisenberg, era aptă exclusiv pentru tratarea unor sisteme periodice închise. Ea descria stări și tranziții posibile și permitea să se calculeze nivelele energetice, precum și oscilațiile „rezonatorilor virtuali”, asociate salturilor cuantice, dar nu putea prezice cum se va comporta un sistem în condiții exterioare determinate. În curînd însă, s-a văzut că pe baza mecanicii matriceale se pot face cel puțin afirmații statistice cu privire la comportarea unui sistem, în cazul cînd legăturile acestuia cu un alt sistem sînt slabe. Atunci energia sa nu este constantă, matricea ei nu are numai elemente diagonale, dar valoarea ei medie este o matrice diagonală, iar elementul, care înseamnă energia medie în a n -a stare sub acțiunea perturbației, poate fi conceput ca rezultatul salturilor cuantice dintre a n -a stare și toate celelalte stări ale sistemului neperturbat, fiecărui salt revenindu-i o anumită probabilitate de trecere care se poate calcula pe baza legăturilor date. În schimb, nu se poate spune nimic cu privire la momentul în care are loc saltul cuantic. Dezvoltarea ulterioară a mecanicii cuantice a pus mereu mai clar în evidență caracterul ei statistic, în special cînd s-a reușit să se studieze procesele neperiodice. Dintre formele calculului matriceal imaginate în acest scop vom aminti nu atît teoria numărului q al lui Dirac, cît calculul cu operatori, pe care eu, împreună cu N. Wiener, l-am introdus și l-am verificat

* Congresso Internazionale dei Fisici, Como, Settembre 1927 (V), Bologna.

pe cazuri simple și pe care mai târziu l-au dezvoltat Eckart, Jordan, Von Neumann. Din punct de vedere formal, mecanica ondulatorie a lui De Broglie și Schrödinger poate fi considerată ca un caz particular al teoriei operatorilor, deși ea a avut rădăcini de sine stătătoare și a adus pe primul plan importante puncte de vedere din domeniul fizicii: natura dublă a materiei, care, ca și lumina, sub unele aspecte pare ondulatorie, sub altele pare corpusculară. Cea mai generală versiune a teoriei operatorilor este următoarea: o mărime fizică nu poate fi determinată în general în mod exact prin valoarea unei coordonate, ci poate fi dată numai o lege de frecvență pentru distribuția ei pe întregul domeniu de variabilitate al coordonatei. O asemenea lege de frecvență este determinabilă în general numai printr-o infinitate de date numerice, fie prin variația unei funcții continue, fie printr-un șir de numere discrete; dar aceste două moduri de reprezentare nu sînt principial diferite, deoarece, de exemplu, o funcție continuă poate fi determinată prin șirul discret al coeficienților săi Fourier. De aceea, reprezentăm legea de distribuție cu totul abstract printr-un punct într-un spațiu cu o infinitate de dimensiuni. În acest spațiu poate fi introdusă o metrică, euclideană¹; în acest caz, îl numim spațiu Hilbert. Dar pe lângă sisteme rectangulare de axe discrete, există și sisteme de axe cu distribuție continuă. După cum proiectăm punctul pe axe de un fel sau celălalt, obținem cele două reprezentări ale legii de distribuție cu ajutorul șirurilor numerice sau al funcțiilor.

Fiecărei mărimi fizice îi corespunde un operator liniar, adică o proiecție afină a spațiului Hilbert asupra sa însuși; sau, dacă preferați, o deformare omogenă a acestui spațiu. Exact ca în teoria elasticității, există întotdeauna un sistem principal de axe, caracterizat prin aceea că prin deformare punctele axelor se deplasează doar pe axele respective. Mărimea acestei deplasări, adică valorile axelor principale ale operatorului Q considerat, este domeniul de valori pe care o mărime fizică îl poate lua; el poate fi

¹ Numai că expresia pentru distanță nu mai este o formă pătratică, ci o formă hermitică; și același lucru este valabil pentru toate mărimile de tip matricial.

continuu sau discret. Poziția axelor față de un alt sistem de axe va fi dată printr-o matrice ortogonală Φ . Acestui sistem de axe i se poate atașa un operator q , ale cărui axe principale sînt cunoscute. Atunci elementele matricei Φ sînt funcții de q' și Q' , unde q' și Q' sînt două valori (axe principale) oarecare¹ ale celor doi operatori q și Q . Or, această mărime $\Phi(q', Q')$ are, după Dirac și Jordan, o semnificație fizică simplă: $|\Phi(q', Q')|^2$; ea reprezintă probabilitatea (respectiv densitatea de probabilitate) faptului ca pentru un Q' dat, variabila q' să ia o valoare dată (respectiv, să aparțină unui interval dat $\Delta q'$). Φ se numește amplitudinea de probabilitate. Funcția de undă a lui Schrödinger este cazul ei particular, și anume amplitudinea care aparține operatorilor q și $H \left(q, \frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q} \right)$, unde $H(q, p)$ este func-

ția lui Hamilton; dacă însemnăm, ca de obicei, cu W axele principale ale acestuia din urmă, atunci $|\Phi(q', W)|^2$ este densitatea de probabilitate a faptului că pentru o energie dată, coordonata q' să se afle în intervalul dat $\Delta q'$.

Nu vom insista asupra dezvoltării acestui formalism, ci ne vom ocupa de justificarea empirică a acestei concepții. Ea trebuie căutată în primul rînd în procesele atomice de ciocnire, care aproape că ne impun să interpretăm pătratul modului funcției de undă a lui Schrödinger $|\Phi(q', W)|^2$ ca număr de particule. De exemplu, să considerăm cazul cercetat pentru prima dată de Rutherford, în care o radiație α se ciocnește de nuclee atomice grele; (în virtutea interacțiunii coulombiene dintre sarcini) acestui caz îi corespunde o undă Φ plană, care se împrășteie pe nucleu, și trece într-o undă sferică. Wentzel și Oppenheimer au arătat că obținem într-adevăr formula lui Rutherford pentru numărul particulelor împrăștiate, dacă se acceptă intensitatea undei schrödingerene ca măsură a probabilității. Pot fi calculate și pentru atomi complicați probabilitățile de impuls și ionizare obținîndu-se cunoscutele legi calitative, care au fost cercetate experimental pentru prima dată de Franck și Hertz, și care constituie unul dintre suporturile cele mai sigure ale în-

¹ q' și Q' pot parcurge domenii pluridimensionale.

tregii teorii cuantice. Elsasser a cercetat mai târziu absorbția particulelor α după această metodă și a reușit să arate că cunoscuta teorie clasică a lui Bohr se justifică în anumită măsură.

Dirac a realizat nu de mult o aplicare deosebit de importantă a acestei teorii a ciocnirilor din mecanica ondulatorie, derivînd formula dispersiei optice cu amortizarea radiației. El consideră procesul de împrăștiere a luminii de către atomi ca un fenomen de ciocnire între cuantele de lumină și atomi. Pentru aceasta, e suficient să i se atașeze atomului două stări staționare : una superioară, la care cuanta de lumină este legată, și una inferioară, la care e liberă ; în situația din urmă, cuanta de lumină dispune de un *continuum* de valori ale energiei. Acest model simplu e suficient pentru derivarea formulei de dispersie, iar constanta de amortizare (lățimea liniilor) e exprimată prin legătura dintre atom și cuanta de lumină. La fel se interpretează experimentele lui Wien asupra amortizării luminii emise de radiațiile-canal, constanta de amortizare fiind aceeași. Rămîne de cercetat legătura cu proprietățile atomului și linia spectrală considerată.

Toate aceste rezultate confirmă cu mare forță de convingere concepția fundamentală statistică a mecanicii cuantice. Determinarea principală a proceselor naturale, întotdeauna unanim recunoscută în fizica clasică, trebuie să fie abandonată. Temeiul lăuntric pentru aceasta constă în dualismul undă-corpusul, care poate fi formulat astfel : pentru descrierea proceselor din natură sînt necesare elemente continue și discontinue. Apariția acestora din urmă (corpusele, salturi cuantice) este determinată numai statistic ; dar probabilitatea apariției se propagă continuu sub forma unor unde, care ascultă de legi asemănătoare cu legea cauzalității din fizica clasică.

4

*Despre sensul teoriilor din fizică**

Cel care observă dinafară dezvoltarea științelor exacte ale naturii, rămîne pătruns de două impresii contradictorii : pe de o parte, ansamblul cercetării naturii oferă un tablou al creșterii continue, sănătoase, al înaintării clare și al muncii constructive, vizibil atît în aprofundarea lăuntrică, cît și în aplicarea exterioară la stăpînirea tehnică a naturii, iar pe de altă parte se observă apariția din timp în timp a unor zdruncinări ale ideilor fundamentale din fizică, adevărate revoluții în lumea conceptelor, care înlătură toată cunoașterea anterioară și par să deschidă o nouă epocă a cercetării. Schimbarea bruscă a teoriilor stă într-o opoziție ciudată față de continua curgere și creștere a sferei rezultatelor consolidate. Pentru a desprinde cîteva exemple de răsturnări teoretice, să ne gîndim la ramura cea mai veche, mai demnă de respect a cercetării fizice — astronomia, și la ipotezele despre lumea stelelor, pe care le putem urmări peste milenii. La început, Pămîntul se odihnește ; un disc întins în centrul lumii în jurul căruia se mișcă stelele în dans ordonat. Apoi urmează, cam în același timp cu recunoașterea formei sferice și a mărimii Pămîntului, sistemul lui Copernic asupra lumii, care pune Soarele în centru și atribuie Pămîntului un rol subordonat, printre mulți alți sateliți ai astrului central. Începutul epocii moderne în cercetarea naturii îl marchează teoria lui Newton asupra gravitației, care asigură coeziunea sistemului planetar ; această învățătură domnește în mod ab-

* Cuvîntare ținută în ședința publică a „Societății științelor“ din Göttingen la 10 noiembrie 1928, în „Gött. Nachrichten Geschäftl. Mitt.“, 1928/29, p. 1.

solut timp de aproape două sute de ani. În zilele noastre însă, ea este aruncată peste bord prin teoria relativistă a gravitației, a lui Einstein, care nu mai păstrează nimic conceptual nici din sistemul planetar heliocentric și nici din gravitația care acționează la distanță.

La fel stau lucrurile și în domeniul opticii, unde alternează în reprezentarea naturii luminii, teoria imaginată de Newton după care lumina este un flux de particule minuscule, cu teoria lui Huygens, unde lumina este reprezentată ca o vehiculare de unde în eterul de lumină. La începutul secolului al XIX-lea a avut loc schimbarea bruscă a teoriei corpusculare cu teoria ondulatorie, iar o dată cu trecerea în secolul nostru a început o nouă cotitură, despre care voi mai vorbi. În domeniul electricității și al magnetismului, la mijlocul secolului trecut se remarcă o perioadă revoluționară, în care reprezentarea acțiunilor la distanță a trebuit să cedeze locul ideii transmiterii continue de forță prin eter. Însăși problema profundă a structurii materiei, pe care chimia, ca ramură puternică a copacului fizic, a luat-o sub protecția sa specială, prezenta încă cu puține decenii în urmă contradicția străveche dintre atomistică și reprezentarea continuului, care pare azi decisă în favoarea celui dintâi; dar tocmai aceste chestiuni sînt legate de una dintre cele mai radicale revoluții conceptuale care se petrece azi în fața ochilor noștri, sub numele de teoria cuantelor.

În mic, dezvoltarea, recunoașterea și căderea teoriilor au loc zi de zi, și ceea ce azi este de preț, mîine e învechit, de-abia dacă mai merită o privire istorică retrospectivă. Aici apare întrebarea: ce valoare mai au atunci în general teoriile? Nu sînt ele oare doar un produs secundar al cercetării, un fel de găteală metafizică, aruncată ca o mantie sclipitoare peste „faptele” care numai ele sînt pline de semnificație, în cel mai bun caz un sprijin și ajutor în muncă, stimulent pentru fantezie în timpul meditării asupra noilor condiții de experiență?

Însuși faptul că această întrebare se poate pune arată că sensul teoriilor fizice nu este de loc ceva evident; tocmai de aceea, am ales această temă în expunerea de astăzi. În momentul de față, cînd abia a fost depășită încă o grea criză a noțiunilor fundamentale din fizică, sînt mulți fizi-

cieni care nu sînt pe deplin lămurii care nu ştiu ce să creadă în fond despre cea mai nouă cotitură a teoriei.

Aceste teorii caracteristice pentru epoca noastră, teoria relativităţii şi teoria cuantelor, sînt şi cele mai potrivite pentru scopul nostru, pentru că noi percepem multe din enunţurile lor ca uimitoare, paradoxale, sau chiar lipsite de sens. În cazul teoriilor mai vechi, este de presupus că contemporanilor lor li s-a întîmplat la fel; dar despre aceste impresii ne putem face o idee numai pe baza cercetării istorice. Deoarece eu m-am îndeletnicit prea puţin cu cercetări istorice, mă voi mulţumi cu o scurtă privire retrospectivă asupra perioadelor de criză mai vechi.

Orice reprezentare teoretică porneşte de la aparenţă şi de la semnificaţia sa cea mai la îndemînă. Observarea pămîntului pe care trăim ca imobil, de nezdrcinat, şi a cerului agitat, ne conduce în mod firesc la sistemul geocentric al universului. Înşuşirea luminii de a arunca umbre cu contururi precise poate fi înţeleasă cel mai simplu prin ipoteza corpusculară, pe care o întîlnim în formă poetică încă la Titus Lucretius Carus. Din mecanică, devenită mai tîrziu prototipul tuturor teoriilor din fizică, antichitatea nu cunoaşte propriu-zis decît statica, teoria echilibrului. Acest lucru se explică prin faptul că forţele care se aplică asupra pîrghiilor sau altor părţi ale maşinilor pot fi înlocuite şi prin forţa corpului omenesc (sau animal), şi în acest fel fac parte din sfera celor experimentabile nemijlocit prin simţuri.

Care este deci semnificaţia înlocuirii acestor reprezentări primitive — sistemul geocentric al universului, ipoteza corpusculară, în ce priveşte lumina, forţa statică a mecanicii — prin reprezentări noi? Determinantă este desigur nevoia omului de a crede într-o lume exterioară reală, independentă de el, statornică, şi capacitatea sa de a se îndoi de percepţiile sale, în favoarea acestei credinţe. Un obiect se vede de la o mare îndepărtare mai mic decît din apropiere, dar omul vede întotdeauna „obiectul“, şi-l reprezintă mereu ca avînd o mărime invariabilă, şi are încredere, cu o siguranţă absolută, în faptul că dacă se va duce acolo, se va putea convinge punînd mîna şi pipăind obiectul respectiv. Obiectele cu care are de-a face omul primitiv, pietrele, copacii, casele, animalele, oamenii, au

însușirea de a rezista la această examinare. Aici este originea geometriei, care la începuturile sale a fost în genere o teorie despre situația reciprocă și raporturile dintre mărimile corpurilor rigide. În acest sens, geometria este ramura cea mai veche a fizicii ; datorită ei, s-a aflat pentru prima dată că lucrurile lumii exterioare urmează, în ce privește proprietățile lor spațiale, legi stricte. Mai târziu, bucuria procurată de frumusețea acestor legi a avut ca efect faptul că germenul empiric al științei geometrice a fost puțin luat în seamă sau chiar contestat, iar studiul scheletului său logic a devenit scop în sine, ca parte a matematicii. Dar geodezul și astronomul au considerat întotdeauna percepțele geometriei ca enunțuri despre lucrurile reale ale lumii și nu s-au îndoit niciodată că și corpurile, care nu ne sînt direct accesibile din cauza îndepărtării lor, urmează aceleași legi. Aplicarea regulilor geometrice la stele a arătat că ele trebuie să fie foarte departe și foarte mari, că mișcarea lor pe cerul nocturn este numai proiecția adevăratelor traiectorii spațiale și, în sfîrșit, analiza acestor traiectorii în condițiile unei arte rafinate a observării a condus cu necesitate la sistemul lui Copernic. Victoria sa este dovada faptului că credința în legi verificate este mai puternică decît percepția senzorială nemijlocită. Firește că, pe lîngă aceasta, noua teorie trebuie să explice de ce ia naștere tocmai această impresie senzorială, pe care se baza teoria în vigoare pînă acum, recunoscută acum ca falsă. În cazul lui Copernic ajunge pentru aceasta referirea la mărimea globului pămîntesc în raport cu oamenii. Acest exemplu astronomic este tipic pentru toate cazurile următoare. În universul astral avem pentru prima dată o realitate, care este accesibilă numai unui simț, ochiului, ca o impresie adesea obscură și totuși neîndoielnic la fel de reală ca scaunul pe care stau sau ca foaia de hîrtie după care citesc. Această realitate obiectivă a lucrurilor, despre care vorbesc, se bazează întotdeauna și peste tot pe același principiu : subordonarea față de legitatea generală fizică și geometrică. Chiar și scaunul îl consider real numai pentru că el prezintă proprietățile constante pentru corpurile solide de acest fel ; geometria și mecanica, necesare pentru aceasta, sînt familiare fiecărui om, ca experiență inconștientă. Nu sînt altele

nici temeiurile care există pentru a considera punctulețul de lumină, pe care-l numim Marte, un glob gigantic, asemenea Pământului; numai că aici trebuie să observăm mai exact și să aplicăm în mod conștient geometria și mecanica. Credința în realitate a omului naiv, neînarmat cu știința, este în fond identică cu aceea a savantului. Filozofii admit acest punct de vedere, ca practic de neînlocuit, sub numele de realism empiric; datorită simplității sale, el are față de diferitele orientări idealiste o situație grea. Noi nu vrem însă să intrăm aici în disputele școlilor filozofice, ci doar să arătăm cât se poate de clar, ce fel de realitate este aceea care constituie obiectul cercetării naturii. Nu este realitatea percepțiilor senzoriale, a senzațiilor, sentimentelor, ideilor, pe scurt nu este realitatea subiectivă, și de aceea absolută, a evenimentelor trăite, ci este realitatea lucrurilor, a obiectelor, care servesc percepțiilor ca substrat. Noi nu recunoaștem niciodată drept criteriu al acestei realități o impresie senzorială, o trăire izolată, ci numai inserarea în legitatea generală, pe care o descoperim în fenomene.

Ceea ce a fost expus aici, prin exemplul luat din astronomie, se repetă mereu și în dezvoltarea fizicii. Noi am sesizat în fond sensul tuturor teoriilor și vrem acum să dovedim că toate revoluțiile care s-au petrecut în fizică sînt trepte pe calea construirii unei lumi obiective, care unește într-o unitate lipsită de contradicții macrocosmosul astrelor, microcosmosul atomului și cosmosul lucrurilor de toate zilele.

Să considerăm mai întâi mecanica. Perioada sa naivă nu putea să depășească, după cum am observat, teoria echilibrului. Teoria științifică a mișcării sau dinamica este de acum un produs artificial al cercetării. Legile pe care Galilei și Newton le-au dedus din observațiile lor nu pot fi exprimate fără concepte care se află departe de starea naturală a gândirii. E drept că asemenea cuvinte ca masă și forță sînt în uz de cînd e lumea; masa însemna oarecum cantitatea unei substanțe, forța — mărimea unui efort. Dar în mecanică aceste cuvinte capătă un sens cu totul precis; sînt cuvinte artificiale, poate primele care s-au înțipărit, care sună, ce-i drept, ca niște vorbe uzuale, dar a căror semnificație rezultă numai dintr-o definiție anume.

Nu vreau să mă opresc mai amănunțit aici la această definiție de loc simplă, ci doar să amintesc că în ea se găsește un concept, care în perioada preștiințifică n-a jucat nici un rol și în genere poate fi lămurit în mod exact numai cu mijloace auxiliare matematice (cîturi diferențiale), și anume conceptul de accelerație. Dacă se va defini acum masa cu ajutorul acestui concept (ca „rezistență la accelerație“), atunci devine evident că fundamentele mecanicii sînt un produs artificial al spiritului. Experiența legată de corpurile terestre, care a putut fi acumulată în sprijinul noii teorii în perioada dintre Galilei și Newton, era destul de limitată. Și totuși, logica lăuntrică a mecanicii lui Galilei a fost atît de puternică, încît Newton a putut să o aplice la mișcarea astrelor. Marele succes al acestui pas se bazează în esență pe ideea că forța pe care o exercită corpurile cerești unul asupra celuilalt nu este în fond altceva decît forța gravitației, pe care noi o cunoaștem de pe pămîntul nostru. Dar această idee a dus la abandonarea unei reprezentări pînă atunci unanim recunoscute, după care un corp își exercită forța numai asupra vecinătății sale nemijlocite. Statica cunoștea numai asemenea forțe din aproape în aproape. Gravitația terestră apare la Galilei înainte de toate ca un concept matematic auxiliar pentru formularea legii căderii corpurilor. Chiar Newton însuși a considerat acțiunea la distanță de la stea la stea, de care avea nevoie pentru explicarea mișcării planetelor, întotdeauna doar ca un provizorat, care mai tîrziu urmează să fie înlocuit printr-o acțiune din aproape în aproape. Dar urmașii lui Newton au fost atît de puternic impresionați de succesele practice ale teoriei sale gravitaționale, încît acțiunea la distanță a gravitației a fost acceptată nu numai ca ceva dat, ci a fost folosită ca model pentru modul de acțiune al altor forțe: cea electrică și cea magnetică. La început, s-a desfășurat o bătălie sălbatică cu privire la această acțiune la distanță prin spațiul vid. Unii spuneau că este o monstruozitate care contrazice sensul conceptului natural de forță: alții o sărbătoreau ca pe un instrument minunat pentru dezlegarea tainelor universului stelar. Cine are aici dreptate? Noi vom spune: forța gravitațională *newtoniană* este un concept artificial, care are, cu reprezentarea intuitivă de simț al forței în

comun, doar numele. Îndreptățirea sa se bazează numai pe înscrierea în sistemul descrierilor obiective ale naturii ; atît timp cît își îndeplinește aici datoria, el poate fi acceptat ; dar atunci cînd noi experiențe îl dezminț, trebuie să cedeze locul unor concepte noi, cărora li se pretinde ca în cadrul experimentelor cunoscute anterior să concorde cu teoria acțiunii la distanță. Această răsturnare s-a petrecut de-abia în timpul nostru, și anume după o lungă dezvoltare, care este în strînsă legătură cu perfecționarea teoriei electricității și a magnetismului.

După cum s-a mai spus, forțele electrice și cele magnetice au fost explicate, în perioada cînd au fost cercetate pentru prima dată în mod sistematic, cu aproximativ 150 ani în urmă, după modelul forței gravitaționale, ca acțiuni la distanță. Legea lui *Coulomb* a atracției sarcinilor electrice, legea lui Biot și Savart cu privire la acțiunea unui curent asupra unui pol magnetic sînt, ca formă și concepție, modelate după cea *newtoniană*. Dar cînd s-a pornit la construirea edificiului matematic al teoriei s-a întîmplat ceva curios : s-a stabilit că așa-numita teorie a potențialului cuprinde transformări ale acestor legi, care îi dau forma unor acțiuni din aproape în aproape, a acțiunii unor forțe care se transmit în spațiu prin puncte vecine. Această uimitoare echivalență a unor reprezentări atît de eterogene a fost însă prea puțin luată în seamă. Au fost necesare descoperiri noi pentru a-i sili pe fizicieni să dea un răspuns întrebării : „acțiune la distanță sau acțiune din aproape în aproape“ ? Descoperitorul acestor fapte noi a fost Faraday, iar cel care le-a interpretat a fost Maxwell. Ecuațiile lui Maxwell constituie o teorie a acțiunii din aproape în aproape a fenomenelor electromagnetice, însemnînd deci în mod perceptibil întoarcerea la unul dintre modurile de reprezentare mai apropiate de gîndirea naturală. Dar eu cred că acest lucru este cu totul neesențial. Cum stau lucrurile ? Dacă se elimină descoperirile lui Faraday și Maxwell, inducția magnetică și curentul dielectric de deplasare, atunci ecuațiile lui Maxwell nu cuprind nimic altceva decît teoria potențialului existentă dinainte, acea transformare matematică a legii acțiunii la distanță în legea acțiunii din aproape în aproape. Transformările teoriilor fizice, ce au loc la mijlocul secolului

trecut, văzute din acest punct de vedere, nu reprezintă în fond o revoluție care să zdrobească ceea ce există, ci mai degrabă o cucerire de noi ținuturi, care atrage după sine o reorganizare a vechiului domeniu.

Dar o dată cu această cucerire, a fost pus pe prim plan și un concept nou, conceptul de eter cosmic. Căci fiecare acțiune din aproape în aproape are nevoie de un purtător, un substrat, prin intermediul căruia acționează forțele, și deoarece forțele electrice și magnetice pot fi transmise și prin spațiul vid, unde nu există nici un corp obișnuit, nu a rămas nimic altceva de făcut decât admiterea unui corp artificial. Acest lucru a fost cu atât mai ușor de înfăptuit, cu cât într-un alt domeniu, în optică, un asemenea eter a și fost născocit, iar noua teorie a electricității a fost în stare de îndată să identifice acest eter luminos cu cel electromagnetic.

Putem arunca acum o privire asupra teoriei luminii. Aici, după cum am și amintit, polemica dintre teoria corpusculară și cea ondulatorie a fost rezolvată la începutul secolului al XIX-lea în favoarea celei din urmă. Cu tot caracterul ei incisiv, această decizie însemna, în același sens ca mai sus, mai mult o cucerire de pământ de curînd destelenit, cu schimbarea administrativă care urmează după o asemenea cucerire, decât o adevărată revoluție. Căci atât timp cît nu erau cunoscute fenomenele de interferență și de difracție, reprezentările de corpuscule sau de unde foarte scurte erau de fapt echivalente, deci polemica nu-și putea găsi o rezolvare. Faptul că întregul secol al XVIII-lea s-a menținut cu consecvență la teoria corpusculară, a avut în fond motive subiective. În primul rînd, a fost autoritatea lui Newton care, în lipsa unor dovezi contrarii concludente, a preferat teoria corpusculară, ca reprezentare mai simplă. În al doilea rînd, lipseau demonstrațiile matematice că fenomenul frontierei aparent pronunțate dintre umbre poate fi înțeles cu ajutorul undelor scurte; această demonstrație a fost dată pentru prima oară de către Fresnel, atunci cînd a vrut să explice fenomenul de difracție, adică lipsa de frontieră pronunțată a umbrelor. De îndată ce acesta a fost descoperit, nu mai putea încapa nici o îndoială că reprezentarea ondulatorie este cea bună. Aș vrea să accentuez că acest lucru mai e valabil și astăzi, cu toate

că, după cum vom vedea în cele ce urmează, teoria corpusculară cunoaște o puternică renaștere. Așa cum putem observa undele de apă și urmări propagarea lor, tot astfel putem să sesizăm cu aparatele noastre undele de lumină. Ar fi pe deplin lipsit de sens să aplicăm aici alți termeni și alte puncte de vedere decât acolo. Tocmai această siguranță cu privire la existența undelor de lumină conduce la problematica celor mai noi descoperiri din optică, despre care vom vorbi mai departe.

Mai întâi avem de spus câteva cuvinte despre problema eterului. Undele au nevoie de un purtător, și de aceea s-a admis că spațiul universului e ocupat de eterul luminos. Prima perioadă a teoriei eterului are și ea caracterul de traducere naivă a intuiției uzuale. Se cunoșteau ca purtătoare de unde corpurile elastice, și atunci s-a presupus că eterul are aceleași proprietăți ca și substanțele elastice obișnuite. Și anume, nu putea să semene cu un gaz sau cu un lichid, deoarece în acestea se puteau propaga numai unde longitudinale, în timp ce experiența luminii polarizate dovedea fără echivoc transversalitatea undelor de lumină. Trebuia deci să se admită că peste tot în lume există un eter elastic solid, prin care se propagă undele de lumină. Este limpede ce dificultăți apar, atunci când vrem să explicăm cum se mișcă planetele și alte corpuri cerești, fără nici o frînare vizibilă, prin această substanță. De altfel nici nu s-a reușit să se dea o explicație ireproșabilă. proceselor de reflecție și refracție, propagării luminii în cristale și altor fenomene de acest fel. În aceste condiții, a apărut ca o izbăvire teoria lui Maxwell mai cu seamă când ea a fost confirmată și experimental de către Hertz ; acum era posibil să se identifice eterul electromagnetic cu eterul luminos. Dificultățile formale au dispărut fără urmă : căci eterul electromagnetic nu este un corp mecanic cu însușiri cunoscute din experiența brută, ci o plăsmuire de un fel deosebit, întocmai ecuațiilor lui Maxwell, un concept artificial tipic.

Perioada fizicii legată de Maxwell a fost atât de plină de consecințele acestei teorii, încât domnea adesea credința că ar fi fost găsite toate legile esențiale ale lumii anorganice. Căci s-a reușit, după cum se spunea, ca și mecanica să fie așezată în „tabloul electromagnetic“ al lumii ; re-

zistența masei față de accelerație era atribuită efectului inducției electromagnetice. Cu toate acestea se putea deja prevedea sfârșitul dominației acestei teorii, iar dincolo de hotarele ei se situa un domeniu nou și întins, care nu poate fi stăpînit cu mijloacele existente. Cu aceasta, ajungem la perioada cea mai nouă. Ea se caracterizează prin aceea că fizica recurge în critica sa la concepte, care nu mai aparțin în mod exclusiv sferei sale, ci sînt revendicate, ca fiind proprii filozofiei. Dar noi vom pune aici mereu pe prim-plan punctele de vedere ale fizicii.

Ca întotdeauna, și în cazul eterului electromagnetic din univers, au apărut dificultăți conceptuale datorită rafinării artei de a observa; am în vedere vestitul experiment al lui Michelson. Pînă atunci, eterul putea fi prezentat ca o substanță aflată peste tot în spațiul universal în stare de repaus, cu însușiri deosebite; Lorentz, care a murit de curînd, a reușit să arate că toate procesele electromagnetice, cunoscute pe atunci la corpurile aflate în stare de repaus sau în mișcare, pot fi explicate în acest fel. Dificultatea esențială era legată de explicarea faptului că nu se simte nici un vînt eteric pe pămîntul care zboară cu viteză considerabilă prin marea de eter. Lorentz arătase că efectele optice și electromagnetice produse de acest vînt eteric trebuie să fie extrem de mici, adică proporționale cu pătratul raportului dintre viteza pămîntului și viteza luminii, un număr de ordinul de mărime unu, împărțit la o sută de milioane. Mărimile atît de mici au fost, pînă la experimentul lui Michelson, sub pragul observabilității. Acest lucru trebuia deci să se manifeste prin deplasarea undelor de lumină de către vîntul de eter. Dar se știe că nu s-a arătat nici o urmă a efectului nici atunci și nici în repetările de mai tîrziu ale experimentului. Acest lucru era într-adevăr greu de explicat, și cercetarea a fost silită să recurgă la presupuneri de-a dreptul artificiale, de felul ipotezei propuse de Lorentz, după care toate corpurile se scurtează în direcția mișcării lor. Einstein a găsit soluția enigmei în teoria relativității „restrînse”, iar punctul delicat în acest caz a constat în critica făcută conceptului de timp.

Ce este timpul? Pentru fizician, nu este sentimentul duratei, nici simbolul devenirii și pieirii, ci o însușire la

fel de măsurabilă a proceselor ca multe altele. În perioada naivă a științei, pentru formarea conceptului de timp a fost, firește, decisivă intuirea nemijlocită a scurgerii lui, iar univocitatea asocierii scurgerii timpului la conținutul evenimentelor a dus în mod firesc la opinia că timpul ar fi același aici și peste tot în lume. De-abia Einstein a pus pentru prima dată întrebarea, dacă această afirmație are vreun conținut empiric verificabil. El a arătat că simultaneitatea evenimentelor care se petrec în diferite locuri poate fi stabilită numai dacă se ține seama de o ipoteză cu privire la viteza semnalului folosit, iar aceasta, în urma rezultatului negativ al experimentului cu vîntul de eter, l-a condus la o nouă definiție a simultaneității, care însemna o relativizare a conceptului de timp. Două evenimente din locuri diferite nu sînt simultane în sine: ele pot fi simultane pentru un observator și să nu fie pentru altul aflat în mișcare relativă față de primul. Conceptul fizic de spațiu a fost de asemenea inclus în această răsturnare a conceptelor, mai ales atunci cînd — peste cîțiva ani — Einstein descoperea legătura dintre gravitație și noile idei asupra spațiului și timpului. Asupra acestei teorii a relativității „generale” nu pot insista, căci aş depăși cadrul restrîns al acestei prelegeri; mă limitez doar să spun că ea înseamnă în teoria gravitației trecerea de la teoria acțiunii la distanță la teoria acțiunii din aproape în aproape, și ca atare o apropiere de reprezentările intuitive. Dar pe de altă parte, ea cere o abstracție uriașă; spațiul și timpul pierd toate acele însușiri simple, care făcuseră pînă atunci din geometrie și din cinematică instrumente atît de comode ale fizicii. Geometria uzuală a lui Euclid și timpul care i se potrivește sînt reduse acum la simple aproximații ale realității; dar totodată se lămurește cum de a scos-o omenirea la capăt atît de bine pînă atunci, cu această aproximație. În practică, și astăzi o scoatem la capăt cu ea aproape întotdeauna; ba este chiar deprimant că abaterile care pot fi utilizate pentru verificarea teoriei lui Einstein sînt extrem de rar și de greu observabile. Dar, împreună cu unitatea și consecvența lăuntrică a teoriei, ele sînt suficiente pentru a-i asigura recunoașterea din partea fizicienilor, cu excepția cîtorva aflați în afara opiniei unanime.

Care este acum poziția față de eterul cosmic în teoria relativității? La început, Einstein a propus ca acest concept să fie evitat cu desăvîrșire. Căci ar trebui să se înțeleagă prin eter o substanță care să aibă comun cu substanțele obișnuite cel puțin însușirile cele mai primitive. O asemenea însușire este posibilitatea ca particule separate ale sale să poată fi cunoscute și identificate. Dar în teoria relativității n-are sens să se spună: aici, în acest loc al eterului am mai fost o dată. S-ar părea că eterul este o substanță ale cărei particule n-au nici loc, nici viteză. Și cu toate acestea, Einstein a preferat, mai târziu, să folosească în continuare cuvîntul eter, desigur ca pe un concept pur artificial, care nu mai are aproape nimic comun cu reprezentarea obișnuită a unei substanțe. Pentru că, atunci cînd se vorbește despre vibrații și unde în spațiu, este nevoie, măcar din punct de vedere gramatical, să existe un subiect, la care să se refere verbul „a vibra”. Se spune așadar: eterul vibrează, și anume în conformitate cu ecuațiile cîmpului din teoria lui Einstein — aceasta fiind tot ce se poate spune despre el.

Teoria relativității a modificat substanțial și conceptul de masă mecanică contopindu-l cu cel de energie. Tocmai aceste concepte au devenit de cea mai mare importanță pentru fizică, în legătură cu cercetările privind structura materiei și radiațiile; dar ele n-au făcut atîta senzație ca critica conceptelor tradiționale de spațiu și timp, pentru că acestea erau considerate ca ținînd de domeniul filozofiei. De fapt, lucrurile stau astfel (ceea ce va admite orice filozof rezonabil): în timpurile mai îndepărtate, pe cînd științele particulare încă nu se desprinseseră de filozofie, filozofia prelua pur și simplu și păstra reprezentările științifice. Deoarece aceste reprezentări, ca întotdeauna în perioada naivă, corespundeau intuiției, în unele școli a apărut prejudecata că ele ar fi însușiri de neschimbat ale spiritului, cunoștiințe a priori. Firește că e adevărat acest lucru pentru spațiul intuitiv, dar nu și pentru spațiul obiectiv al fizicii, ale cărui însușiri trebuie să corespundă progresului experienței și ordinii sale sistematice.

Și totuși, cu tot noul pe care-l aduce, teoria relativității este mai degrabă încheierea unei dezvoltări — teoria eterului cosmic continuu — decît începutul unei etape noi.

Această etapă începe exact o dată cu secolul nostru, prin teoria cuantelor a lui Planck. Rădăcina sa propriu-zisă și cea mai adâncă este atomistica, adică o teorie străveche, care provine încă de la filozofii greci, și care, pînă în 1900, s-a dezvoltat destul de lin și liniștit, deși mereu se îmbogățea și devenea tot mai rodnică. Chimia a fost prima care a utilizat conceptul de atom ; treptat, acest concept a pătruns și în fizică, unde a ajutat la explicarea proprietăților gazelor și soluțiilor, și de aici s-a îndreptat spre teoria electricității. Trecerea electricității prin soluțiile electrolitice a dus la ipoteza atomilor de electricitate, numiți electroni ; aceasta s-a confirmat atît de strălucit la fenomenele de descărcare în gaze, la radiațiile catodice și *Becquerel*, încît realitatea electronilor a dobîndit curînd aceeași certitudine ca și cea a atomilor materiali. Dar acum, după ce s-a stabilit că electronul este un fel de subatom, cercetarea s-a concentrat asupra problemei descompunerii atomului obișnuit în componentele sale electrice. Ideea era că toți atomii sînt construiți din electroni cu sarcină electrică negativă și din componente cu sarcină electrică pozitivă, a căror natură mai era neclară. Dar acum apare dificultatea, care constă în aceea că, după cum rezultă din calcule matematice simple, particulele purtătoare de sarcină care se află sub acțiunea unor anumite forțe electrice nu pot să fie niciodată într-o stare de echilibru stabil. Erau deci necesare ipoteze cu privire la niște forțe necunoscute, străine, ceea ce firește nu era prea satisfăcător. Atunci a venit marea descoperire a lui Rutherford. El a bombardat atomii cu fragmente atomice emise de corpurile radioactive, așa-numitele radiații α , care, datorită vitezei lor uriașe, pătrund pînă în adîncul atomului nimerit ; din devierile care s-au constatat cu această ocazie, el a dedus cu toată certitudinea că mișcarea particulelor α se petrece astfel ca și cum în centrul atomului s-ar afla o masă grea, extrem de mică, încărcată pozitiv, „nucleul“, care acționează asupra lor cu forțe electrice obișnuite. Devine astfel cu totul improbabil ca unitatea atomului să fie rezultatul unor forțe necunoscute, neelectrice. Dar cum de este posibil echilibrul electronilor în jurul nucleului ? Singura soluție părea să fie ipoteza că electronii nu se află în stare de repaus, ci se mișcă în

jurul nucleului pe orbite, așa cum se mișcă planetele în jurul Soarelui. Ce-i drept, cu aceasta nu s-a câștigat prea mult, căci un asemenea sistem dinamic este extrem de instabil. Să ne imaginăm în ce haos s-ar transforma sistemul nostru planetar, dacă ar avea nenorocul să treacă în apropierea unei stele mari străine ! Iar atomii unui gaz suportă 100 de milioane de ciocniri pe secundă, fără cea mai ușoară modificare a proprietăților lor !

Din punctul de vedere al teoriei de la sfârșitul secolului al XIX-lea, care astăzi este denumită de obicei, pe scurt „teoria clasică“, această uimitoare stabilitate a atomului era o enigmă absolută. Dar uriașul material factic pe care îl adunaseră între timp cei care se ocupau cu spectroscopia oferea o enigmă tot atît de rea-voitoare. Era aici un mesaj direct din interiorul atomului, sub forma unor oscilații luminoase emise, și acest mesaj nu suna de loc ca un jargon ininteligibil, ci ca o limbă bine încheată, numai că nu putea fi înțeleasă ! Mai ales la gaze structura spectrului era ușor de stabilit : el constă din linii colorate izolate, corespunzînd fiecare unei singure oscilații, pur periodice, iar aceste linii sînt situate după legități simple. Ele se ordonează în așa-numitele serii în așa fel, încît pe baza numărului de ordine al liniei respective, cu ajutorul unei formule foarte simple, poziția unei linii în spectru poate fi stabilită destul de bine. Aceste formule au fost stabilite mai întîi de Balmer, pentru hidrogen, și mai tîrziu de alți cercetători, îndeosebi de Runge și Rydberg pentru multe alte substanțe. Munca plină de farmec a fotografierii și măsurării spectrelor a atras un mare număr de fizicieni, și astfel, cu trecerea anilor s-a acumulat un uriaș material de observație, din care s-au putut trage multe concluzii importante în diferite probleme particulare din fizică, chimie și astronomie, dar al căror sens propriu-zis rămînea ascuns. Situația era aceeași ca și cu dispăruta populație Maya din ale cărei scrieri s-au găsit numeroase fragmente în ruinele localităților din Yukatan ; numai că, din păcate, nimeni nu le poate citi.

În fizică, cheia scrierii secrete a fost găsită pînă la urmă, și anume, pe o curioasă cale ocolită. La sfârșitul veacului era tocmai foarte la modă examinarea radiației corpurilor solide incandescente. Făcînd abstracție de im-

portanța tehnică a problemei pentru fabricarea becurilor și a altor astfel de produse, se spera că dezvoltarea ei va aduce și concluzii teoretice profunde. Kirchhoff a dovedit, pe baza unor raționamente termodinamice incontestabile, că radiația care iese din interiorul unui creuzet incandescent printr-o fantă trebuie să dea un spectru de tip universal, care ar fi cu totul independent de natura substanțelor aflate în creuzet și în pereții săi; iar experiența a confirmat acest raționament. De aceea, s-a presupus că măsurarea „radiației vidului” va permite să se tragă concluzii cu privire la proprietăți cu totul generale ale proceselor ondulatorii, și aceste așteptări n-au fost înșelate. Acum, pare totuși de mirare că una dintre cele mai profunde legi a putut fi găsită pe această cale. Căci — pentru a continua șirul ideilor începute cu imaginea limbii străine — nu erau ascultate cuvinte articulate ale unor indivizi, ci se îngăduia unei mulțimi să strige de-a valma, și din acest vuiet se auzea cuvîntul — cheie, prin care tot restul devenea inteligibil. Creuzetul incandescent este de asemenea un tablou astfel compus, care cuprinde nenumărați atomi agitați, care ne transmit harababura lor de unde. Trăsătura caracteristică a spectrului acestei dezordini este empiric de așa natură, încît are o anumită nuanță de culoare care arată a roșu, galben sau alb strălucitor, după temperatură; aceasta înseamnă că aici un anumit șir de oscilații dependent de temperatură apare cel mai pronunțat, treptat intensitatea scade la ambele extremități, atît în direcția oscilațiilor mai rapide cît și a celor mai lente, pînă la zero. Or, teoria clasică cerea ca în direcția oscilațiilor rapide intensitatea să crească constant. Aici apărea din nou o contradicție de nerezolvat în cadrul legilor unanim recunoscute pe vremea aceea.

După ce nenumărate încercări de a rezolva această contradicție, prin raționamente false în interiorul teoriei clasice, au dat greș, Planck s-a încumetat în anul 1900 să facă o afirmație pozitivă, care se reduce la următoarele: energia particulelor oscilante din creuzet nu se modifică continuu prin irradiație, ci discontinuu, în salturi, iar raportul dintre cuanta de energie transmisă la fiecare salt și frecvența oscilațiilor luminii emise sau absorbite reprezintă o constantă universală. Acest număr, care azi se nu-

mește constanta lui Planck, a putut fi calculat în mod riguros pe baza experimentelor cu privire la radiația termică și a fost apoi de nenumărate ori recalculat prin cele mai variate metode, fără ca valoarea inițială să se fi modificat în mod esențial.

De fapt, se descoperise o nouă constantă fundamentală a naturii, comparabilă cu viteza luminii sau cu sarcina electronului. Nimeni nu se îndoia de acest lucru, dar pentru cei mai mulți a fost dificil să admită ipoteza cuantelor de energie. Numai Einstein și-a dat seama curînd că această ipoteză explică alte ciudățenii care apar în procesul transformării energiei mecanice în radiație. Trebuie să spun cîteva cuvinte despre cel mai important dintre aceste fenomene: așa-numitul efect fotoelectric. Dacă lumina de o anumită frecvență cade pe o placă metalică situată în vid înaintat, se observă că electronii sînt smulși din placă. Ceea ce este curios la acest proces constă în faptul că de intensitatea luminii depinde numai numărul electronilor emiși, dar nu și viteza lor. Pentru înțelegerea intuitivă a acestui fenomen, reprezentarea de undă nu este de nici un folos; căci dacă placa de metal se îndepărtează de sursa luminoasă, unda incidentă devine tot mai slabă, mai subțiată, și este de neînțeles cum ar putea ea să transmită electronului mereu aceeași cantitate de energie. Einstein a observat că acest fenomen poate fi înțeles de îndată ce se admite că lumina nu este formată din unde, ci este un flux de particule; deși traiectoria proiectilului dintr-o mitralieră se subțiază, de asemenea, pe măsura îndepărtării, totuși fiecare proiectil în parte își păstrează forța de pătrundere. Combinînd această idee cu ipoteza cuantelor a lui Planck, Einstein a prezis că energia particulei de lumină, deci și a electronului emis, trebuie să fie egală cu frecvența înmulțită cu constanta lui Planck. Experimentele au confirmat pe deplin acest rezultat. Și astfel am obținut o renaștere a vechii teorii corpusculare a luminii într-o formă nouă.

Conflictul care a apărut de aici ne va mai preocupa în cele ce urmează. În prealabil, să mai spunem cîteva cuvinte despre dezvoltarea mai departe a teoriei cuantelor. Se știe că Niels Bohr a avut ideea să utilizeze ipoteza lui Planck la interpretarea proprietății atomului; el a

admis că — spre deosebire de sistemele planetare clasice — atomii pot exista numai într-un șir de stări discrete și că la trecerea de la o stare la alta se emite sau se absoarbe lumină, raportul dintre frecvența ei și variația energiei atomului fiind exprimat prin constanta lui Planck. Prin aceasta, toate contradicțiile mai sus enunțate, dintre experiență și teoria clasică, se reduc la o cauză unică și se rezolvă prin ipoteza cuantelor discrete de energie. Stabilitatea atomului se explică prin existența unei stări cuantice „inferioare”, în care atomul persistă și în cazul perturbațiilor, atîta timp cît acestea nu ating valoarea celui mai scăzut prag energetic posibil în atom. Existența acestui prag energetic cu valoare minimă a fost dovedită experimental de Franck și Hertz prin bombardarea atomilor (de vapori de mercur) cu electroni de viteză cunoscută. Cu această ocazie a fost confirmată totodată și ipoteza lui Bohr cu privire la emisiunea luminii ; căci de îndată ce energia electronilor cu care se bombarda a depășit primul prag energetic, a fost emisă lumina monocromatică cu o frecvență care se poate calcula cu relația lui Planck în funcție de energie. În acest fel, uriașul material de observație acumulat de spectroscopie s-a transformat, dintr-odată, dintr-o grămadă de numere și reguli neînțelese, într-o informație prețioasă asupra stărilor posibile ale atomilor și diferențelor energetice dintre ele. Dar și mai mult : condițiile de excitare ale diferitelor spectre care pînă atunci păreau cu totul enigmatice au putut fi înțelese pe deplin.

În ciuda acestui succes uriaș, ideile lui Bohr mai aveau de parcurs un drum lung și dificil de la aceste reprezentări fundamentale simple cu privire la stările staționare, pînă la o mecanică a atomului completă și necontradictorie. Aici întîlnim iarăși o etapă primitivă, în cursul căreia legile mecanicii uzuale au fost aplicate pe cît posibil mai mult la orbitele electronilor din atom, și este remarcabil că acest lucru a fost posibil într-o anumită măsură, în ciuda contradicției ireconciliabile dintre caracterul continuu al mărimilor clasice și procesele discontinue (salturile) ale teoriei cuantice. Dar pînă la urmă, s-a ajuns la modificarea necesară a mecanicii, în așa fel încît discontinuitatea să fie luată în considerație. Noua mecanică cuantică s-a

constituit în forme diferite : în parte, după o idee fundamentală propusă de Heisenberg aici la Göttingen, în parte, sub forma așa-numitei mecanici ondulatorii a lui De Broglie și Schrödinger. Aceste formalisme s-au dovedit pînă la urmă în fond identice ; ele formează laolaltă un sistem logic închis, care nu rămîne în urma mecanicii clasice, în ce privește desăvîrșirea lăuntrică și aplicabilitatea în practică. Dar la început, ele n-au fost decît formalisme, și urma ca sensul lor să fie de-abia treptat descoperit. De altfel, în cercetările din fizică se întîmplă foarte des ca, fiind dat un material experimental bogat, să fie mai ușor de stabilit o relație formală decît înțelese cu adevărat semnificațiile. Cauza acestui fenomen este immanentă cunoașterii fizice : doar lumea obiectelor fizice se află în afara domeniului simțurilor și a intuiției, care se situează numai la frontiera ei ; or, este greu să luminezi de pe graniță interiorul unui domeniu întreg. Dar în domeniul teoriei cuantice apăreau dificultăți cu totul deosebite ; aș vrea să mă opresc asupra celei mai importante ; reînvierea teoriei corpusculare a luminii. Reprezentarea despre existența unor cuante de lumină care se mișcă separat unele de altele a fost confirmată de către un șir de experimente ulterioare, mai ales de experimentul lui Compton. Aceasta a arătat că la ciocnirea unui asemenea cuante de lumină cu un electron (realizată ca împrăștiere a radiațiilor Röntgen, datorită substanțelor cu mulți electroni liberi, ca de pildă parafinele) acționează obișnuitele legi ale ciocnirilor din mecanică, de parc-ar fi vorba de bile de biliard. În afară de aceasta, cuanta primară de lumină cedează o anumită energie electronului lovit ; de aceea, cuanta de lumină care ricoșează are o energie mai mică și — în conformitate cu relația lui Planck — o frecvență mai mică decît cea inițială. Pierderea de frecvență a radiațiilor Röntgen împrăștiate, care rezultă de aici, a fost dovedită experimental ; tot astfel, existența electronilor de respingere.

Astfel, nu mai rămînea nici o îndoială că afirmația după care lumina ar consta din particule este cu totul îndreptățită. Dar cealaltă afirmație, după care lumina ar consta din unde, este tot atît de îndreptățită. Atunci cînd am vorbit despre dovezile cu privire la natura ondulatorie

a luminii, am văzut că în fiecare fenomen de interferență undele de lumină apar la fel de clar și lămurit în fața noastră, ca și undele de apă sau undele sonore. Dar existența în același timp a corpusculilor și a undelor pare intuiției cu totul incompatibilă. Cu toate acestea, teoria trebuie să rezolve problema aducerii ambelor reprezentări la un numitor comun, ce e drept nu în imperiul intuiției, ci în imperiul relațiilor obiective fizice, în care are drept la existență numai ceea ce este logic noncontradictoriu și determină concordanța prezicerii teoretice cu practica experimentală. Această problemă a fost rezolvată prin revizuirea critică a conceptelor fundamentale, exact la fel ca în teoria relativității.

Fundamentul întregii teorii cuantice este relația lui Planck dintre energie și frecvență, care trebuie să fie proporționale. Dar acest „postulat cuantic” exprimă de fapt un nonsens. Căci conceptul de energie se referă evident la o particulă (cuantă de lumină sau electron), deci la un lucru de o întindere minimă; conceptul de frecvență se referă însă la unde, care trebuie să ocupe în mod necesar o mare porțiune a spațiului; ba, strict vorbind, spațiul întreg căci dacă dintr-un tren de unde pur periodice se decuplează o porțiune, atunci el nu mai este periodic. Identificarea energiei unei particule cu frecvența unei unde este deci, ca atare, o absurditate totală. Dar absurditatea dispare îndată ce renunțăm la un principiu, care în fizica mai veche era considerat întotdeauna valabil: principiul determinismului. Mai înainte vreme, ne-am fi așteptat ca procesul fotoelectric, în cursul căruia o undă luminoasă extrage un electron dintr-o placă metalică, să fie determinat în toate amănuntele, astfel încât să aibă sens întrebarea: când și în ce loc va fi expulzat un electron? sau, ceea ce înseamnă același lucru, ce cuantă de lumină, în ce loc și în ce timp a intrat în acțiune cu ocazia ciocnirii de o placă?

Să admitem că am renunța la această întrebare, ceea ce de altfel este cu atât mai ușor, cu cât nici unui experimentator nu i-ar da prin cap să și-o pună, și cu atât mai puțin să răspundă la ea. De fapt, este o întrebare cu totul fictivă; experimentatorul se mulțumește să stabilească: câte particule apar și cu ce energie?

Să nu întrebăm deci unde se află o particulă în mod exact, ci să ne mulțumim să știm că se află într-o anumită porțiune mai mare a spațiului ; atunci dispare contradicția dintre teoria ondulatorie și cea corpusculară. E cel mai ușor să vezi acest lucru, dacă se atribuie undei funcția de a determina probabilitatea de apariție a unei particule, adică se admite cazul că energia particulei este legată de frecvența undei prin relația lui Planck. Dacă porțiunea din spațiu luată în considerație e mare, deci trenul de unde este aproape neperturbat și are un caracter pur periodic, atunci îi corespunde o frecvență bine determinată și o energie a particulei bine determinată ; numai că locul unde apar particulele în porțiunea de spațiu rămîne cu totul nedeterminat. Dacă vrem să stabilim mai exact locul particulelor, trebuie să micșorăm porțiunea de spațiu în care se observă procesul ; aceasta se poate face renunțînd la o porțiune de undă, ceea ce distruge caracterul ei strict periodic. Dar această perturbare, care are un caracter nepериодic, se poate descompune într-un număr mai mare sau mai mic de oscilații strict periodice ; atunci fiecareia din diferitele frecvențe ale acestei mulțimi îi va corespunde o altă energie a particulelor observate. O determinare exactă a locului strică deci determinarea energiei și invers.

Această lege a limitării măsurabilității este astăzi pe deplin confirmată. Fiecărei mărimi extensive (ca porțiuni determinate de spațiu și timp) îi corespunde o mărime intensivă (ca viteza și energia), astfel încît, cu cît este mai exact determinată una dintre ele, cu atît mai puțin exact este determinabilă cealaltă ; și anume, se constată că produsul intervalelor de precizie a două asemenea mărimi interconectate este tocmai constanta lui Planck. Tocmai aceasta este adevărata semnificație a acestei constante a naturii, care înainte era atît de enigmatică : ea este limita absolută de precizie a tuturor măsurătorilor. Numai mărimea ei atît de redusă explică de ce a fost descoperită atît de tîrziu.

Pornind de la acest punct de vedere, devine posibilă interpretarea formalismului mecanicii cuantice în fiecare caz în parte, astfel încît legătura cu conceptele intuitive ale experimentatorului să fie realizată, fără ca să apară cîndva vreo contradicție.

Firește, acest lucru nu poate avea loc fără sacrificarea unor reprezentări obișnuite. Dacă vorbim, spre exemplu, despre o particulă, sîntem obișnuiți să ne reprezentăm concret întreaga sa traiectorie. Se poate proceda astfel și în continuare, dar cu multă prudență în ce privește concluziile. Căci dacă există intenția de a verifica experimental o asemenea traiectorie admisă, atunci în general însăși verificarea — oricît de minuțioasă — va modifica această traiectorie, în virtutea existenței limitei absolute de precizie. Principal, mai importantă este sacrificarea determinismului, înlocuirea descrierii strict cauzale printr-una statistică.

Probabilitatea și statistica au jucat și înainte un rol în fizică, în fenomenele de masă (de exemplu, în teoria cinematică a gazelor). Dar aceste metode erau considerate de obicei ca mijloace auxiliare în cazurile în care cunoașterea detaliilor nu este suficientă. Dacă s-ar cunoaște poziția și viteza tuturor particulelor unui sistem închis la un moment dat, atunci cursul ulterior ar trebui să fie pe deplin determinat și ar putea fi prezis prin calcul. În anumită privință, aceasta corespunde și practicii cu corpurile mari. Gîndiți-vă la legenda lui Wilhelm Tell. Atunci cînd Tell, înainte de a ținti mărul, a înălțat către cer o scurtă rugăciune, desigur că el a cerut să aibă o mîină calmă și o privire clară, cu încrederea că atunci săgeata își va găsi singură drumul spre măr. Tot astfel, fizicianul a presupus că dacă el va putea ținti destul de exact electronii săi și proiectilele sale de radiații α vor nimeri sigur atomul dorit; el nu se îndoia că acesta nu este decît o chestiune de practică și că va fi soluționată din ce în ce mai bine, pe măsura progresului artei experimentării. Acum, în schimb, se afirmă că țintirea însăși are o limită a preciziei. Dacă Gessler i-ar fi ordonat lui Tell să doboare un atom de hidrogen de pe capul fiului său cu ajutorul unei particule α și dacă i-ar fi dat în locul arbaletei cele mai bune instrumente de laborator din lume, arta lui Tell nu i-ar fi folosit la nimic; rămînea o întîmplare dacă nimerea în plin sau dacă dădea greș.

Imposibilitatea de a măsura exact toate datele unei situații ne împiedică să-i determinăm cu anticipare viitorul. Prin aceasta, principiul cauzalității, în accepția sa obiș-

nuită, își pierde orice sens. Căci dacă e principal imposibil să cunoaștem toate condițiile (cauzale) unui proces, este o vorbărie goală să se spună că fiecare întâmplare are o cauză. Firește că această opinie va fi contrazisă de către aceia care consideră determinismul ca trăsătură esențială a cercetării naturii. Dar există și alții, care sînt dimpotrivă de părere că mecanica cuantică nu afirmă nimic nou în problema determinismului. Determinismul ar fi și în mecanica clasică doar o amăgire și n-ar avea nici o importanță practică [1] ; căci în realitate — în ciuda mecanicii — pretutindeni este valabil principiul care stă la baza oricărei statistici : cauze mici, efecte mari. Dacă, de pildă, se consideră că atomii unui gaz sînt bile mici, atunci, în cazul unei presiuni normale, durata liberă medie dintre două ciocniri este de multe mii de ori mai mare decît diametrul atomului ; o mică abatere a direcției de ricoșare în cazul unei ciocniri va face ca la ciocnirea următoare o lovitură în plin să se transforme într-un eșec, iar o deviere bruscă, într-o trecere nestînjenită. Toate acestea sînt neîndoielnic juste, dar nu ating fondul problemei. Să ne mai gîndim o dată la Tell : ce exemplu mai bun se poate da pentru propoziția privitoare la cauza mică și efectul mare decît acea ochire a mărului, în cazul căreia precizia cu care se nimerește ținta decide între viață și moarte ? Și totuși, această poveste se întemeiază pe ideea pe care putem să ne-o facem despre un trăgător ideal care poate să facă întotdeauna și mai mică eroarea de ochire a țintei decît o pretinde ținta cea mai infimă — presupunînd, firește, că nici o influență neprevăzută, ca de exemplu vîntul, nu va devia proiectilul. Tot astfel, în mecanica clasică poate fi conceput un caz ideal : dacă se dau un sistem pe deplin izolat față de influențele dinafară și o stare inițială exact determinată, atunci o apropiere de acest țel, chiar dacă e dificilă, nu există nici un motiv să o considerăm imposibilă. Mecanica cuantică afirmă însă imposibilitatea. Deosebirea îi apare practicianului ca lipsită de importanță ; dar pentru structura logică a teoriei, descoperirea existenței unei limite absolute a preciziei este de mare importanță.

Fără această concepție statistică, chiar dacă facem abstracție de toate perspectivele filozofice, în cadrul re-

trîns al fizicii, contradicția dintre proprietățile corpusculare și cele ondulatorii ale radiației nu poate fi rezolvată. Și tocmai aici și-a sărbătorit teoria marele ei triumf : ea a prevăzut, pe baza unor temeuri formale, că în anumite condiții și radiațiile materiale, atomi sau electroni în mișcare, trebuie să manifeste caracteristici ondulatorii, iar experimenterii au confirmat între timp această precizare prin minunate experimente de interferență cu radiații catodice.

Deși noua teorie apare astfel ca avînd o justificare experimentală certă, se poate pune totuși întrebarea dacă în viitor, prin restructurare sau rafinare, ea nu va redeveni deterministă. La aceasta putem răspunde astfel : se poate arăta matematic exact că formalismul unanim admis al mecanicii cuantice nu permite nici o extindere de acest fel. Dacă cineva nu vrea totuși să renunțe la speranța că determinismul va reveni cîndva, atunci trebuie să considere teoria existentă în momentul de față ca falsă în conținut ; anumite enunțuri ale acestei teorii ar trebui să fie refutable experimental. Pentru a-i converti pe adepții teoriei statistice deterministul nu trebuie deci să protesteze ci să experimenteze.

Firește că unii oameni salută, dimpotrivă, cu bucurie îndepărtarea fizicii de determinism. Îmi aduc aminte că în perioada în care apăruseră primele lucrări cu privire la semnificația statistică a mecanicii cuantice, a venit la mine un om, care mi-a adus niște broșuri oculte și m-a considerat copt pentru a fi convertit la spiritism. Dar există și observatori serioși ai dezvoltării științifice, care văd în actuala cotitură din fizică prăbușirea unei concepții despre lume și anunță începutul unei reprezentări noi, mai profunde, a esenței „realității”. Doar fizica recunoaște singură că există „lacune în seria determinărilor”. Ce drept mai are ea în acest caz, să-și prezinte construcțiile ca pe niște „realități” ? O dată cu determinismul s-ar fi prăbușit „ imaginea statică a lumii”, a cosmosului desăvîrșit în sine și guvernat de la un capăt la altul de legi neclintite. Devine posibilă o nouă imagine dinamică a lumii, care trebuie comparată „nu cu pretinsa armonie a cerului înstelat și a legilor sale eterne, ci cu istoria neliniștită a omenirii, în care nimic nu rămîne egal cu sine însăși, fie că

e vorba de sens, de efort sau de soartă" [2]. Nu știu cum trebuiesc interpretate aceste cuvinte. Trebuie oare fizicianul să renunțe la vechile metode, după eșecul teoriei sale deterministe, și să încerce să avanseze prin cufundarea în „sens, efort și soartă” sau cuvintele respective trebuie doar să discrediteze valoarea imaginii fizice a lumii, în comparație cu alte concepții despre lume, care ajung la o mai profundă cunoaștere a realității, frământându-se asupra „sensului, efortului și sortii” ?

Față de asemenea considerații, este important să se arate cu claritate că noua mecanică cuantică nu este nici mai mult și nici mai puțin revoluționară ca oricare altă teorie nou constituită. De fapt, este vorba iarăși despre cucerirea unor ținuturi de curînd descoperite ; se constată și aici, ca și în cazurile anterioare, că vechile principii nu mai corespund pe deplin și trebuie să fie înlocuite în parte prin altele noi. Dar iarăși se păstrează vechile reprezentări ca un caz-limită, și anume : aparțin acestui caz-limită toate fenomenele, la care constanta lui Planck poate fi neglijată, fiind foarte mică, în raport cu mărimile respective. Ceea ce se întîmplă în lumea corpurilor mari satisface de aceea cu mare exactitate vechile legi deterministe ; abateri există numai în atomistică. Dacă mecanica cuantică are o particularitate, aceasta constă în faptul că ea nu decide între două reprezentări apriori egal posibile (corpusculă și undă), ci, după aparenta victorie a uneia asupra celeilalte, restabilește în drepturi pe aceea de-a doua și le reunește pe amîndouă într-o unitate superioară. Jertfa cerută în acest scop este ideea determinismului ; dar aceasta nu înseamnă renunțarea la legile stricte ale naturii. Numai faptul că determinismul face parte din sfera uzuală a conceptelor filozofice a făcut ca noua teorie să fie resimțită ca deosebit de revoluționară.

Cu aceasta sper că am arătat că întreaga dezvoltare a teoriilor fizice, pînă la forma cea mai nouă, e dominată de o năzuință unitară și că din fiecare exemplu în parte a reieșit clar și sensul acestei năzuințe. Vreau să încerc să îl exprim încă o dată, într-o formă ceva mai generală : lumea trăirilor noastre este nesfîrșit de bogată și de variată, dar haotică și legată de subiectul respectiv. Acesta tinde să-și ordoneze impresiile și să le comunice celorlalți.

Limba și arta, cu variatele sale mijloace de expresie, sînt asemenea căi de transmitere de la suflet la suflet, desăvîrșite în felul lor, dacă e vorba despre obiecte ale lumii sufletești, dar puțin potrivit pentru comunicarea unor reprezentări exacte cu privire la lumea exterioară. Aici începe misiunea științei. Ea extrage din abundența trăirilor cîteva forme simple și construiește din ele, cu ajutorul gîndirii, o lume a lucrurilor obiective. În fizică, toată „trăirea” constă din activitatea de construire a aparatelor și din citirea indicațiilor instrumentelor indicatoare. Dar datele astfel obținute sînt suficiente pentru a recrea, prin intermediul gîndirii — cosmosul. La început apar imagini, care sînt puternic influențate de intuiția uzuală ; treptat, reprezentările devin tot mai abstracte, toate conceptele vechi sînt aruncate și înlocuite cu altele noi. Dar oricît de mult se îndepărtează lumea construită a lucrurilor de intuiția uzuală, ea se află totuși la sursele sale într-o legătură indisolubilă cu percepțiile simțurilor și nu există nici un enunț al teoriei celei mai abstracte, care în ultimă instanță să nu exprime o relație între datele observațiilor. De aici, rezultă că fiecare nouă observație zdruncină întregul edificiu, astfel încît se pare că teoriile cresc și dispar. Dar tocmai aceasta îl atrage și îl tentează pe cercetător, și plămuirea spiritului său n-ar fi decît un oaspete trist, dacă nu ar exista această permanentă moarte și devenire.

Bibliografie

- [1] R. V. Mises, *Probabilitate, statistică și adevăr*, J. Springer, 1928. Vezi în legătură cu aceasta și studiul: *Este mecanica clasică într-adevăr deterministă?*, inclus în lucrarea noastră la p. 204.
- [2] K. Riezler, *Criza „realității”*, în „Științele naturii” 16 (1928), p. 105.

*Considerații filozofice
cu privire la fizica modernă**

Catedra ce mi-a fost încredințată în calitatea de succesor al profesorului Darwin, este strâns legată de numele unui mare învățat din generația anterioară, anume Peter Guthrie Tait. Numele său mi-a devenit familiar încă de la începutul perioadei studiilor mele la Göttingen, când Felix Klein era acolo în fruntea unui grup de matematicieni eminenți, printre care se aflau Hilbert și Minkowski. Îmi aduc aminte că în străduința sa statornică de a lega între ele fizica și matematica, Klein nu lăsa să îi scape nici o ocazie de a ne arăta nouă, studenților, importanța studierii cu râvnă a cărții *Treatise on Natural Philosophy* de Thomson și Tait astfel încât, acest tratat a devenit pentru noi un fel de carte de căpătii.

De atunci încoace fizica teoretică s-a dezvoltat într-o cu totul altă direcție, iar lucrarea lui Thomson și Tait nu mai este probabil de loc cunoscută generației mai tinere. Aceasta este însă soarta tuturor operelor din domeniul științelor naturii. Ele nu pot fi etern-valabile, așa cum sînt operele marilor artiști, dar dacă la timpul lor ele au servit cunoașterii, înseamnă că și-au îndeplinit datoria. Această carte exercita asupra mea o anumită atracție și datorită titlului ei, căci aici specialitatea, care în alte țări e numită în mod uscat „fizică“, apare sub denumirea răsunătoare de „filozofia naturii“, pe care o poartă și ambele catedre de

* Conferința de deschidere la preluarea catedrei de filozofie a naturii a profesorului Tait, la Universitatea din Edinburgh. Publicat în „Proc. Roy. Soc. Edinburgh“, vol. LVII, partea I. 1936—1937, pp. 1—18.

fizică ale universității noastre. Această denumire îi acordă științei noastre o demnitate proprie, întrucît îi amintește fizicianului, în mijlocul măsurărilor și calculelor sale monotone și îndelungate, faptul că munca sa servește totodată și unei misiuni mai înalte : de a așeza fundamentul pentru o filozofie a cunoașterii naturii. Eu am încercat întotdeauna să concep munca mea proprie ca o contribuție modestă la această misiune ; așa se întîmplă că la preluarea catedrei de filozofie a naturii a profesorului Tait mă simt spiritualicește acasă, chiar dacă mă aflu departe de patria mea de origine.

Justificarea faptului că această ramură particulară a științelor naturii este concepută ca o doctrină filozofică rezidă nu atît în amploarea domeniului pe care-l cuprinde — doar fizica consideră întregul univers de la atom la sferele cerești ca obiect de cercetare — cît mai ales în faptul că atunci cînd studiază aceste lucruri în totalitatea lor, fizicianul întîmpină la fiecare pas dificultăți logice și de domeniul teoriei cunoașterii. Cu toate că fizica se ocupă la urma urmei numai de un domeniu limitat al cunoașterii, neglijînd cu totul întrebările privitoare la fenomenele vieții și ale conștiinței, rezolvarea acestor probleme constituie totuși o nevoie profundă a imboldului nostru spre cunoaștere.

Încercînd o descriere a evoluției istorice, putem să pornim de la întîmplarea fericită a coincidenței dintre granița secolelor și granița dintre așa-numita perioadă clasică a fizicii și fizica modernă. Teoria relativității, publicată de Einstein în anul 1905, poate fi considerată atît ca încoronare a concepției clasice, cît și ca izbucnire a ideilor noi. Dar încă în cursul celor zece ani precedenți, datorită cercetărilor asupra radiației și atomilor, care sînt legate de numele lui Röntgen, J. J. Thomson, Becquerel, soții Curie, Rutherford și de ale multor alora, s-a acumulat un mare număr de fapte noi, care nu mai puteau fi puse de acord cu reprezentările clasice. Noul concept al cuantei de acțiune, care a contribuit mult la explicarea lor, a fost promovat de Planck în anul 1900. Primele concluzii importante ale acestei reprezentări de un gen nou au fost trase de Einstein în 1905, anul publicării teoriei relativității, întrucît el a creat bazele pentru o teorie cuantică a

luminii, iar apoi de Niels Bohr în anul 1913, prin legarea reprezentării cuantice de structura atomului.

Fiecare capitol al cunoașterii din domeniul științelor naturii se află într-o strânsă legătură reciprocă cu sistemele filozofice din aceeași epocă ; științele naturii furnizează fapte de observație, iar filozofia, moduri de gândire. Filozofia secolului al XIX-lea, pe care se sprijineau reprezentările clasice, se întemeia în esență pe ideile filozofice ale lui David Hume. Din filozofia sa s-au dezvoltat ambele sisteme de gândire, care au dominat științele naturii în timpul sfârșitului perioadei clasice : filozofia critică și empirismul.

Deosebirea dintre aceste două sisteme se referă la ideea de *a priori*. Concepția după care științele naturii pot fi reduse pe cale logică la un număr minim de postulate sau axiome își are originea la marii matematicieni ai Greciei antice, care au încercat pentru prima dată să stabilească axiome ale geometriei și să deducă din acestea un sistem desăvârșit de teoreme. De atunci încolo, întrebarea cu privire la motivele care au determinat stabilirea tocmai a acestor axiome și nu a altora a stîrnit permanent interesul matematicienilor și filozofilor, și chiar opera lui Kant ar putea fi considerată ca un fel de generalizare gigantică a acestei probleme. El a încercat să formuleze postulate, pe care le-a denumit categorii *a priori*, și a cercetat temeiurile valabilității acestor postulate, care ar stabili baza oricărei experiențe. Rezultatul acestor cercetări a fost stabilirea a două feluri de principii *a priori* : cele analitice, care stăpînesc toată gândirea logică, inclusiv aritmetica, și cele sintetice, care cuprind legile spațiului și timpului, ale substanței, cauzalității și în general ale tuturor conceptelor generale de acest tip. Kant credea că temeiul valabilității principiilor de primul tip s-ar afla în însăși rațiunea pură, în timp ce cele de-al doilea tip ar deriva dintr-o capacitate deosebită a minții noastre, adică din „intuiția pură”, pe care o deosebea de rațiunea pură. Astfel el a definit matematica ca pe o știință care se bazează pe principii *a priori*, adică pe proprietăți ale minții noastre și deci stabilite o dată pentru totdeauna. Aceeași accepție a fost dată și marilor principii generale ale fizicii stabilite de Newton.

Eu mă îndoiesc totuși că el s-ar fi menținut la acest punct de vedere, dacă ar fi trăit ceva mai mult. Elaborarea geometriei neeuclidiene de către Lobacevski și Bolyai a zdruncinat concepția *apriorică*. Gauss și-a exprimat deschis opinia, după care axiomelor geometrice nu li s-ar cuveni nici o poziție privilegiată față de aceea a legilor fizicii și că atât unele cât și celelalte s-ar baza pe experiență, întrucât principiile matematice ar exprima legi pentru mișcarea solidelor rigide și condițiile pentru măsurători în spațiu. Majoritatea fizicienilor au aderat treptat la acest punct de vedere empiric, care respinge existența principiilor apriori ca legi ale rațiunii pure și ale intuiției pure, susținând dimpotrivă, că valabilitatea fiecărei afirmații din domeniul științelor naturii (inclusiv al geometriei, întrucât e aplicată la natură) se bazează pe experiență. E necesar să ne exprimăm aici cât se poate de precaut; căci, firește, nu se poate crede că fiecare principiu fundamental, ca de pildă, axiomele geometriei euclidiene, s-ar baza direct pe experiență. Obiectul unei examinări empirice poate fi numai ansamblul unui domeniu de cunoaștere logic coerent în sine și noi putem considera confirmarea experimentală a unui număr suficient de mare de propoziții drept dovadă a valabilității întregului sistem, incluzând axiomele, care reprezintă cea mai scurtă expresie logică a sistemului.

Nu cred că empirismul poate fi cât de cât contestabil în această formă. El are avantajul de a fi ferit de rigiditatea care este inerentă oricărui sistem filozofic apriori și deschide calea liberă spre o cercetare pe deplin nelimitată. Fizica modernă a făcut uz într-adevăr în mare măsură de această libertate. Ea nu s-a îndoit numai de valabilitatea apriorică a geometriei euclidiene, așa cum au făcut-o marii matematicieni din secolul trecut, ci a și înlocuit-o, în realitate, prin noi forme ale geometriei, ba chiar a unit geometria cu fenomene fizice (gravitația) și a revoluționat apoi în același fel aproape toate categoriile a priori, cea a timpului, a substanței și a cauzalității.

Desigur, eliberarea de ideea apriorică a fost de o mare importanță pentru dezvoltarea fizicii, dar acest lucru a avut loc încă în decursul secolului trecut și nu constituie deosebirea decisivă dintre fizica clasică și cea modernă. Aceasta

rezidă mult mai mult în atitudinea generală față de noțiunea unei lumi obiective. Fizica clasică a acceptat ca de la sine înțeles faptul că există o asemenea lume obiectivă, nu numai independent de observator, dar și observabilă de el, fără ca prin aceasta să fie perturbată. Firește că fiecare măsurătoare înseamnă o anumită perturbare a fenomenului observat, dar s-a presupus că printr-o experimentare iscusită perturbarea poate fi redusă la un minim neglijabil. Fizica modernă a arătat însă că tocmai această presupunere este falsă. Problema filozofică, în fața căreia ne vedem puși în acest fel, este însă dificultatea de a vorbi despre starea unei lumi obiective, dacă această stare este dependentă de ceea ce face observatorul. Acest lucru duce la o examinare critică a ceea ce înțelegem noi prin expresia de „lume obiectivă“.

Recunoașterea faptului că observațiile sînt dependente de punctul de vedere al observatorului nu pune problema într-o lumină nouă. Orbita Pămîntului în jurul Soarelui are exact forma unei elipse numai pentru un observator care se găsește în centrul de greutate comun al acestor două corpuri cerești. Teoria relativității a arătat însă pentru prima dată, pe un exemplu concret, că includerea observatorului în descrierea faptelor observate nu este chiar așa de simplă, și duce de aceea la un punct de vedere cu totul nou, tocmai pentru a putea menține ideea unei lumi obiective. Einstein, după cum a recunoscut el însuși, a fost puternic influențat în această privință de ideile lui Ernst Mach, fizicianul și filozoful vienez, ale cărui scrieri constituie sursa unei noi mișcări filozofice pe care în prezent mulți o simpatizează — pozitivismul logic. Influența acestei mișcări poate fi urmărită și în publicațiile fundamentale ale lui Heisenberg asupra teoriei cuantelor. Dar pozitivismul a întîmpinat totuși și o rezistență puternică, de exemplu din partea lui Planck. Cu toate acestea, pozitivismul este o forță motrice a cercetării din domeniul științelor naturii. El este de asemenea unicul sistem filozofic al timpului nostru, care tocmai în virtutea propriilor sale reguli, e obligat să țină pasul cu progresul științei. De aceea, ne vedem nevoiți să luăm poziție în această chestiune.

O trăsătură esențială a pozitivismului este demarcarea netă între problemele semnificative și cele lipsite de sens

și, corespunzător, între conceptele cărora le corespunde un sens real și cele care nu au un asemenea sens.

Este un fapt cunoscut banal, că nu orice întrebare corectă din punct de vedere gramatical are și un sens. Să ne amintim de cunoscuta anecdotă prin care se cere să determinăm vârsta căpitanului unui vapor, cunoscând lungimea, tonajul și puterea vasului. Sau observația unui auditor al unei prelegeri de popularizare a astronomiei: „Eu am înțeles cum se măsoară distanța la o stea, și toate celelalte, dar nu pot să pricep de unde se știe că steaua respectivă se numește Sirius?”. Tot astfel, popoarele primitive au convingerea că cunoașterea numelui „adevărat” al unui lucru ar fi o cunoaștere reală, care ne-ar înzestra cu o putere mistică în ce privește lucrul respectiv. Există de asemenea multe exemple din care rezultă că un asemenea fetișism al cuvintelor mai persistă în mare măsură și în lumea noastră modernă. Dar permiteți-mi să trec acum la un exemplu din fizică, la care această situație nu este atât de evidentă. Fiecare crede că cunoaște înțelesul expresiei „evenimente simultane” și presupune ca de la sine înțeles că această expresie are exact aceeași semnificație pentru toată lumea. Pentru vecinii de pe mica noastră planetă, această presupunere este chiar ordinea firească a lucrurilor, iar dacă admitem că pe altă stea se află ființe de aceeași natură ca și noi, atunci pare în primul moment că nici pentru ei conceptul de timp nu ar fi o problemă. Dificultatea a ieșit la iveală de-abia atunci când s-a pus întrebarea cum ar putea să compare între ei observațiile lor cu privire la întâmplări simultane un observator de pe Pământ și altul care se află, de exemplu, pe Marte. De aici înainte era necesar să se ia în considerație faptul că comunicarea nu poate avea loc decât cu ajutorul semnalelor. Semnalul cel mai rapid, dintre cele care ne stau la dispoziție, este un semn luminos. Dar din moment ce ne servim de lumină sau chiar ne gândim doar la ea, nu mai putem pune temei numai pe inteligența noastră și pe puterea noastră de reprezentare, ci trebuie să apelăm la ajutorul experimentelor. Acestea nu ne-au arătat numai că lumina posedă o anumită viteză finită, dar vestita experiență a lui Michelson a confirmat și faptul extrem de important că lumina se propagă pe Pământ cu aceeași viteză în toate

direcțiile, independent de mișcarea Pământului în jurul Soarelui. De obicei, acest fapt se exprimă spunând că experimentul neagă existența așa-numitului vînt eteric, la care ne-am fi putut aștepta prin analogie cu vîntul pe care-l simțim într-o trăsură care se mișcă.

Observarea acestor fapte l-a condus pe Einstein, cu o logică demnă de admirat, la recunoașterea faptului că întrebarea cu privire la simultaneitatea a două întîmplări care se petrec în locuri diferite este aproape la fel de lipsită de sens ca și ghicitoarea cu privire la vîrsta căpitanului. La fel, după cum chestiunea privitoare la vîrstă capătă totuși un sens prin adăugarea unor date suplimentare, ca de exemplu cu privire la asigurarea pe viață a căpitanului, tot astfel devine plină de sens întrebarea despre simultaneitate, dacă adăugăm date cu privire la mișcarea observatorului. În acest fel, conceptul de timp își pierde însă caracterul său absolut, conceptul de spațiu este de asemenea atras în această răsturnare, pentru că devine lipsit de sens să vorbești despre „spațiul dintr-un anumit moment”. Dacă admitem că doi observatori care se află într-o mișcare relativă unul față de celălalt trec tocmai unul prin fața celuilalt, atunci fiecare dintre ei va avea propriul său „spațiu la un moment dat”, dar evenimentele care au loc în acest spațiu nu vor fi aceleași pentru ambii observatori.

Cum mai rămîne, în aceste condiții, cu ideea unei lumi independente de observator? Dacă vom fi prizonierii reprezentării totalității spațiale a lucrurilor la un moment dat, atunci trebuie să renunțăm la ideea unei lumi obiective. Dar putem să ne menținem la această idee, dacă considerăm lumea ca o totalitate de evenimente, în care fiecăruia îi revine nu numai un anumit punct în spațiu, ci și un anumit timp. Minkovski a arătat că se poate da o descriere a conexiunii tuturor evenimentelor, care să fie independente de observator, adică, în limbaj matematic, invariantă, dacă este considerat fiecare eveniment ca un punct al unui *continuu* cu patru dimensiuni, înzestrat cu o geometrie cvasieuclidiană. Împărțirea acestei lumi cva-dridimensionale în spațiu și timp depinde însă de observator.

Cînd în anul 1920 am scris o carte de popularizare a teoriei relativității, eram atît de influențat de această con-

cepție uimitoare, încît am considerat-o ca pe cea mai mare cucerire a fizicii, ca metoda, cu ajutorul căreia se poate menține conceptul de lume obiectivă. Pe atunci nu bănuiam că în curînd ne vom vedea puși într-o situație empirică cu totul nouă, care ne silește la o cercetare critică cu mult mai profundă a acestui concept.

Am folosit aici expresia „o nouă situație empirică“, urmîndu-l în această privință pe Niels Bohr, întemeietorul teoriei moderne a atomului și cel mai profund gînditor din domeniul fizicii. El a folosit această expresie pentru a sublinia că nașterea unor noi și nemaiîntîlnite reprezentări fizice nu este rezultatul unei speculații libere, iresponsabile ci al unei analize riguros critice, a unui enorm complex de fapte ale experienței colective greu de cuprins. Fizicienii nu sînt revoluționari, ci mai degrabă conservatori, și numai motive stringente îi pot determina să jertfească o reprezentare pînă atunci bine fundată. În cazul teoriei relativității, necesitatea a fost într-adevăr deosebit de stringentă, chiar dacă materialul doveditor e format în mare parte din constatări negative, ca de exemplu demonstrarea absenței vîntului eteric. Teoria relativității generale, pe care Einstein a formulat-o în 1915, punînd în conexiune geometria spațio-temporală a lumii cu gravitația, se întemeia pe atunci și se mai întemeiază și astăzi pe o bază empirică cu mult mai slabă.

A doua răsturnare revoluționară din fizică, teoria cuantică, se bazează pe o uriașă mulțime de date experimentale, care crește zi de zi. Să vorbești despre această dezvoltare este însă cu mult mai greu, pentru că ea se află într-o mare măsură pe un tărîm de strictă specialitate. Este vorba aici mai ales de problema structurii materiei și naturii radiației, problemă a cărei cercetare poate fi abordată numai cu aparate de laborator foarte sensibile. Materialul de demonstrație acumulat constă din plăci fotografice, din tabele și curbe, rezultate ale măsurătorilor, care sînt adunate în toată lumea într-o cantitate enormă, dar care sînt totuși accesibile numai specialistului. Firește, nu pot presupune acum că dumneavoastră ați fi familiarizați cu asemenea experimente, totuși, în ciuda acestor dificultăți, voi încerca să vă dau o idee despre felul în care se pune pro-

blema și asupra soluției cunoscute sub numele de mecanică cuantică.

Permiteți-mi să încep cu vechea problemă, și anume aceea a naturii luminii. La începutul epocii noastre, în imperiul științelor naturii existau două teorii rivale: teoria corpusculară a lui Newton și teoria ondulatorie a lui Huygens. Au trebuit să treacă o sută de ani, pentru ca descoperirea interferenței să decidă în favoarea teoriei ondulatorii. Dacă două trenuri de unde sînt astfel interferate, încît creasta uneia coincide cu depresiunea celeilalte, atunci ele se sting reciproc. Astfel, ia naștere din două trenuri de unde care se încrucișează modelul binecunoscut, pe care îl putem constata pe suprafața oricărui lac, unde niște rațe iscă, înotînd, unde de apă. Exact același model se produce dacă se încrucișează două raze de lumină, numai că în acest caz, pentru a putea observa, avem nevoie de o lentilă măritoare. Concluzia trasă de pe urma observării acestui fenomen, care a fost sprijinită prin nenumărate experimente, a fost că o rază de lumină este un tren de unde de lungime de undă scurtă.

Dar după ce a mai trecut o sută de ani, pe vremea studenției mele, un alt șir de experimente păreau să impună tot atît de convingător ideea că lumina ar consta din corpuscule. Poate că cea mai bună cale pentru a prezenta cît mai limpede argumentarea respectivă va fi o comparație cu modul cum acționează anumite arme de luptă, și anume bombele și mitraliera. Dacă explodează o bombă, atunci toți cei care se găsesc în vecinătate vor fi omorîți de energia undei de explozie, în timp ce la o distanță mai mare sîntem în deplină siguranță, deoarece unda de explozie a pierdut energia sa periculoasă, în virtutea extinderii uniforme pe un teritoriu mai întins. Să ne închipuim acum, că aceeași cantitate de substanță explozivă este folosită ca muniție pentru o mitralieră, care se învîrte în toate direcțiile. Și de data aceasta, toți cei ce se află în apropiere vor fi loviți cu o certitudine destul de mare, dacă nu se vor îndepărta cît se poate de repede. La o distanță de cîteva sute de metri, ei vor fi însă într-o siguranță mult mai mare, dar firește nu deplină. Probabilitatea de a fi nimerit a descrescut în mod extraordinar: dar dacă cineva e lovit, atunci efectul este tot atît de fatal.

Acest exemplu prezintă intuitiv diferența dintre propagarea continuă a energiei dintr-un centru, în mod ondulatoriu, și o aversă discontinuă de particule. În anul 1900 Planck a descoperit prima indicație a discontinuității luminii în legile radiației termice a corpurilor încălzite. În anul 1905 Einstein a publicat vestita sa lucrare, amintită mai sus, în care arată că experimentele cu privire la acțiunea energetică a luminii, așa-numitul efect fotoelectric, pot fi interpretate ca o dovadă a structurii corpusculare a luminii. Aceste corpuscule se numesc cuante de lumină sau fotoni.

Interpretarea dublă a naturii luminii a fost confirmată prin cele mai diferite experimente. Cel mai important pas înainte l-a făcut în cele din urmă Bohr, atunci când a arătat că enormul material factic acumulat cu privire la spectre poate fi explicat și înțeles de asemenea cu ajutorul conceptului de cantă de lumină. În acest scop, el a trebuit să extindă ideea unei comportări discontinue și asupra mișcării particulelor de masă, anume asupra electronilor din atomi, care emit lumina.

În acest cadru, nu pot să urmez pas cu pas dezvoltarea istorică a teoriei cuantice, care a dus pînă la urmă la recunoașterea faptului că aici avem de-a face cu un principiu mult mai general. Lumina nu este singura „radiație” pe care o cunoaștem. Ajunge să amintim aici doar de radiațiile catodice, care apar atunci când un curent electric trece printr-un tub cu vid, sau de radiațiile care sînt emise de rădău sau de alte substanțe radioactive. Aceste radiații nu sînt radiații de lumină, ci de electroni foarte iuți, adică de atomi de electricitate sau chiar de atomi obișnuiți de heliu, care se mișcă cu o mare viteză. Acest din urmă fapt a fost demonstrat printr-o metodă directă de către Rutherford, care a interceptat într-un recipient de sticlă cu vid așa-numitele radiații α ale rădăului și a arătat că la sfîrșit recipientul era umplut cu heliu. Astăzi urma lăsată de asemenea particule la trecerea lor prin materie poate fi realmente fotografiată.

În cazul radiațiilor α , la început a apărut dovada că e vorba despre corpuscule. În anul 1924, De Broglie a ajuns însă, pe baza unui raționament teoretic, la ideea că și acest tip de radiație trebuie să prezinte, în anumite condiții fa-

vorabile, fenomene de interferență și deci comportamentul unei radiații ondulatorii. Și într-adevăr, în curînd această idee temerară a fost demonstrată experimental. Nu numai electronii, ci și atomii unor substanțe obișnuite, cum sînt hidrogenul sau heliul, prezintă toate proprietățile de undă, dacă, imprimîndu-le o viteză considerabilă, sînt transformați în radiații.

Acesta este un rezultat extrem de tulburător, care revoluționează toate reprezentările noastre despre substanță și mișcare. Atunci cînd a devenit cunoscut, fizica teoretică era pregătită în vederea acestui lucru, și pentru tratarea sa avea deja la dispoziție instrumentul matematic potrivit: mecanica cuantică. Aceasta fusese dezvoltată de către Heisenberg, împreună cu Jordan și cu mine, și de sine stătător, de către Dirac, iar în altă formă, ca mecanică ondulatorie, de către Schrödinger, în strînsă legătură cu reprezentările lui De Broglie. Un formalism matematic oferă servicii cu totul minunate în descrierea lucrurilor complicate, fără a contribui totuși prea mult la înțelegerea reală a proceselor. Astfel, au trecut mai mulți ani, pînă s-a ajuns la o asemenea înțelegere și chiar și atunci numai într-o măsură limitată. Dar aceasta ne conduce nemijlocit la raționamentele filozofice, pe care vreau să le expun aici.

Dacă se ia în considerație adîncă discrepanță, care constă în faptul că noi descriem unul și același proces uneori ca pe o aversă de particule și uneori ca pe o mișcare ondulatorie, atunci oricui i se impune întrebarea: „ce este dar în realitate”? Vedeți, așadar, cum se leagă strîns chestiunea filozofică privitoare la realitate cu această problemă pur fizică. Temeiul pentru aceasta se află în faptul că noi vorbim despre particule și unde ca despre lucruri binecunoscute, dar depinde de metoda de observație, de alegerea expresiei potrivite. Astfel, în fața noastră apare o situație asemănătoare, ca în cazul principiului relativității, numai că încă mai complicată, pentru că aici cele două descrieri ale aceluiași proces nu sînt numai deosebite, ci aparent incompatibile. Oricine își dă seama, desigur, că o mișcare ondulatorie și mișcarea unei particule sînt două forme de mișcare, care, aplicate aceluiași obiect, nu sînt compatibile. Și problema devine încă mai serioasă, dacă punem la socoteală și relația cantitativă simplă dintre ener-

gie și frecvență, stabilită dinainte de Planck. Este clar că proprietățile unei radiații date, care apare ca aversă de particule, trebuie să fie în legătură cu proprietățile pe care le are această radiație atunci când se manifestă ca tren de unde. Acesta și este cazul de fapt, iar legea corespunzătoare este extrem de simplă, dacă toate particulele radiației au aceeași viteză. Experiența arată că în acest caz trenul de unde asociat este de cea mai simplă formă, numită armonică, și se caracterizează printr-o frecvență și o lungime de undă bine determinată. Atunci, în conformitate cu legea lui Planck, energia cinetică a particulei este direct proporțională cu frecvența undei, iar factorul de proporționalitate, așa-numita constantă h a lui Planck, are o valoare numerică bine determinată, stabilită experimental cu mare exactitate.

Tocmai aici se află dificultatea logică: o particulă cu o viteză dată este ca atare un punct care nu posedă nici o extindere spațială. Un tren de unde însă, prin definiție, este armonic numai atunci când ocupă tot spațiul și are durată eternă. Această ultimă cerință nu este poate în mod nemijlocit evidentă; ea se bazează pe teorema matematică demonstrată de Fourier cu peste 100 de ani în urmă, după care orice tren de unde, finit în spațiu și timp, trebuie să fie considerat ca suprapunere a mai multor trenuri de unde, armonice infinite, de diferite frecvențe și lungimi de undă, astfel încât părțile exterioare ale acestor trenuri de undă se anulează reciproc, datorită interferenței; și fiecare undă finită poate fi astfel descompusă în componentele sale armonice. Bohr a pus un accent deosebit pe aceste dificultăți logice, întrucât spunea că prin legea lui Planck se introduce un element irațional în descrierea naturii.

Într-adevăr, nu e posibil să depășim această dificultate, fără a sacrifica unul dintre principiile fundamentale ale științelor naturii, și anume, aici este vorba despre principiul cauzalității, așa cum era înțeles de la prima sa formulare exactă. Nu mă pot opri decât pe scurt asupra acestei chestiuni. Legile mecanicii, în forma în care au fost dezvoltate de Newton și Galilei, permiteau să se prevadă mișcarea unei particule materiale, dacă sînt date poziția și viteza sa într-un anumit moment dat. Sau, mai general, dacă condițiile inițiale sînt cunoscute, atunci poate fi pre-

cizat dinainte comportamentul viitor al unui sistem. Din punctul de vedere al mecanicii, lumea este de la început un automat determinat, lipsit de orice libertate. N-am avut niciodată o atitudine amicală pentru acest determinism extrem și sînt bucuros că fizica modernă s-a eliberat de el. Dar nu toți sînt de aceeași părere.

Pentru a înțelege relația dintre reprezentarea cuantică și conceptul de cauzalitate, trebuie să mai luăm în considerație și cea de-a doua lege fundamentală, care se referă la legătura dintre particulă și undă. Exemplul nostru cu mitraliera și cu bomba care explodează ne va fi aici din nou de folos în înțelegerea problemei. Dacă mitraliera nu va fi pusă să tragă numai orizontal, ci în mod uniform în toate direcțiile spațiului, densitatea proiectilelor și deci probabilitatea de a fi atins va descrește în același raport în care cresc ariile sferelor concentrice pe care se distribuie uniform bătaia focului de mitralieră. Aceasta corespunde însă exact cu reducerea energiei undei de explozie pe măsura propagării ei. Dacă vom observa acum radiația care pornește de la o mică sursă de lumină, recunoaștem îndată că sub aspect corpuscular numărul fotonilor emiși va scădea o dată cu creșterea distanței, în același fel ca energia care se propagă în mod continuu în cazul propagării undelor. Eu am extins acest punct de vedere asupra electronilor și a tuturor celorlalte tipuri de particule, afirmînd că avem de-a face cu unde de probabilitate, care modifică în așa fel distribuția particulelor, încît intensitatea undei este egală în fiecare punct cu probabilitatea de a întîlni în acel punct o particulă. Această interpretare a fost confirmată printr-un mare număr de experimente directe și indirecte. Dacă particulele se mișcă nu independent unele de altele, ci influențîndu-se reciproc, atunci teoria trebuie să fie întrucîtva modificată, dar pentru scopul nostru este suficientă examinarea cazului simplu. Acum putem să analizăm relația dintre legile cuantice și cauzalitate.

A determina poziția unei particule înseamnă a o încadra fizic într-o porțiune mică a spațiului. Atunci, în virtutea celei de-a doua legi cuantice, trebuie ca și unda corespunzătoare de probabilitate să fie de asemenea încadrată din această mică porțiune din spațiu. Dar, după cum am văzut, cu ajutorul unei descompuneri Fourier, o asemenea

undă poate fi reprezentată ca suprapunere a unor unde armonice simple, ale căror frecvențe și lungimi de undă se întind asupra unui mare domeniu. Dacă vom aplica acum prima lege cuantică cu privire la proporționalitatea frecvenței și energiei, atunci vom recunoaște că această stare, bine determinată din punct de vedere geometric, trebuie să cuprindă energii ale căror valori se extind la un domeniu foarte mare. Relația inversă este de asemenea valabilă. Am stabilit astfel calitativ renumita relație de nedeterminare a lui Heisenberg: determinarea exactă a poziției și cea a vitezei se exclud reciproc; determinînd cu exactitate una dintre ele, devine nedeterminată cealaltă.

Legea cantitativă stabilită de Heisenberg spune că produsul dintre intervalul de nedeterminare a poziției și intervalul de nedeterminare a impulsului ($\text{masa} \times \text{viteza}$) este totdeauna același, și anume egal cu constanta h a lui Planck.

Iată dar care este adevăratul sens al acestei constante: ea determină granița absolută a preciziei unei determinări simultane a poziției și vitezei. Pentru sisteme mai complicate, există alte perechi sau grupe de mărimi fizice, a căror măsurare exactă nu este posibilă simultan.

Să ne amintim acum că în cadrul mecanicii clasice este nevoie tocmai de cunoașterea exactă a poziției și a vitezei la un moment dat, pentru a determina de aici mișcarea viitoare. Legile cuantice contrazic această presupunere, ceea ce înseamnă prăbușirea determinismului și a cauzalității. Am putea spune că această idee nu este de-a dreptul eronată, ci lipsită de conținut, căci premisa nu e niciodată împlinită.

Recunoașterea faptului că descoperirea legilor cuantice constituie totodată sfîrșitul aceluia determinism strict, care e o trăsătură esențială a fizicii clasice, este ca atare de mare importanță filozofică. După ce teoria relativității a schimbat concepția noastră despre spațiu și timp, acum trebuie să fie supusă schimbării încă una dintre categoriile *kantiene*, și anume conceptul de cauzalitate. Caracterul *aprioric* al acestor categorii nu mai poate fi menținut. Dar, bineînțeles, aceasta nu înseamnă că aceste principii dispar pur și simplu; ele vor fi înlocuite prin ceva nou. În ce privește spațiul și timpul, acest ceva nou constă din legile geome-

triei cvadridimensionale ale lui Minkowski. Pentru conceptul de cauzalitate, există de asemenea un concept mai general, supraordonat, și anume acela de probabilitate. Necesitatea este un caz particular de probabilitate : ea este o probabilitate de 100%. Fizica se dezvoltă de acum încolo spre o știință în esență statistică.

Teoria matematică, pe care o numim mecanica cuantică, și care exprimă aceste idei într-o formă exactă, este un minunat edificiu de idei, care nu numai că este comparabil cu mecanica clasică, dar chiar o depășește. Structura teoriei matematice arată că întreaga construcție este logic coerentă ; dar acest lucru se impune numai acelor care înțeleg formalismul matematic. De aceea, este o sarcină urgentă să arătăm în mod direct, prin intermediul câtorva exemple importante, de ce nu poate totuși să apară nicio dată vreo contradicție, în ciuda folosirii a două reprezentări intuitive atât de deosebite, ca particulele și undele. Pentru aceasta, se pot examina din punctul de vedere al relației de nedeterminare a lui Heisenberg, instalațiile experimentale convenabil alese. În cazurile mai complicate, aceasta duce uneori la rezultate oarecum deosebite și paradoxale, care au fost cercetate cu grijă de către Heisenberg, Bohr și Darwin, predecesorul meu la Edinburgh.

Vreau să amintesc aici numai un astfel de caz. Dacă privesc printr-un microscop, pot să observ un microb și să-i urmăresc mișcările. De ce nu ar fi posibil acest lucru și pentru atomi și electroni, pur și simplu prin folosirea unui microscop mult mai puternic ? Răspunsul este că „a privi printr-un microscop” are aceeași semnificație cu trimiterea prin acest instrument a unei raze de lumină, adică a unei raze de fotoni. Aceasta se ciocnește de particulele care urmează să fie observate. Dacă e vorba despre obiecte relativ grele, ca microbii, sau chiar ca atomii, atunci acestea nu sînt influențate în mod esențial de izbitura fotonilor ; iar fotonii, deviați și apoi adunați laolaltă cu ajutorul unei lentile, vor oferi într-adevăr o imagine a obiectului. Dacă însă este vorba despre o particulă atât de ușoară cum e electronul, atunci ea va suferi la ciocnirea cu fotonul o izbitură, un efect observat pentru prima dată în mod direct de către Compton. Schimbarea de viteză a electronului este pînă la un anumit grad nedeterminată și de-

pinde de condițiile fizice în așa măsură, încît și aici are loc relația de imprecizie a lui Heisenberg.

Bohr a introdus pentru cele două aspecte de reprezentare, corpuscular și ondulatoriu, denumirea de „complementare”. După cum toate culorile vizibile pot fi rînduite în perechi de culori complementare, care dau laolaltă culoarea albă, tot astfel, toate procesele fizice pot fi considerate din două puncte de vedere, dintre care unul corespunde aspectului corpuscular, iar al doilea celui ondulatoriu, și care niciodată nu ajung să se contrazică reciproc, dar amîndouă sînt necesare pentru înțelegerea deplină a proceselor din natură.

Folosirea unei expresii atît de scurte și de pregnante pentru descrierea unei stări de fapt complicate și dificile se dovedește foarte utilă, de pildă, ca răspuns la întrebarea naivă : ce este o rază de lumină, ce este materia * „în realitate”? O mulțime de particule sau o mișcare ondulatorie ? Oricine a înțeles o dată sensul noțiunii „complementar” va respinge această întrebare, pentru că este prea simplistă și nu atinge esența lucrurilor. Cu aceasta nu este însă rezolvată chestiunea dacă noua teorie e compatibilă cu reprezentarea unei lumi obiective, existente independent de observator. Dificultatea nu constă în cele două aspecte, ci în faptul că nici un fenomen din lumea atomică nu poate fi descris fără a ține seama de observator, și anume nu numai de viteza sa proprie, după cum procedează teoria relativității, ci și de întreaga sa comportare în cursul executării observației, de așezarea instrumentelor sale ș.a.m.d, ș.a.m.d. Însăși observația intervine în mersul evenimentelor. Cum se poate vorbi atunci despre o lume obiectivă ?

La această întrebare, unii fizicieni teoreticieni, de exemplu Dirac, răspund scurt și cuprinzător : ceea ce căutăm este o teorie matematică consistentă. Ea cuprinde tot ce se poate afirma despre lumea empirică. Cu ajutorul ei putem prezice efecte pînă acum neobservate, și nici nu dorim nimic mai mult. Ce înțelegeți voi sub denumirea de lume obiectivă nu știm și nici nu ne interesează.

* Din acest exemplu și din altele asemănătoare rezultă că Max Born identifică materia cu substanța — N.R.

Împotriva unui asemenea punct de vedere nu se poate obiecta nimic, în afară de faptul că necesarmente el se va limita la un cerc restrîns de specialiști. Întrucît mă privește, nu pot împărtăși această atitudine de *l'art pour l'art*. După concepția mea, cunoștințele din domeniul științelor naturii trebuie să fie prezentate într-un mod care să fie pe înțelesul fiecărui om care gîndește. Și tocmai în aceasta constă misiunea filozofiei naturii.

Cu toate acestea, filozofii se ocupă astăzi de alte chestiuni, mai importante pentru viața umană, decît dificultățile care apar în cursul cercetării rafinate a proceselor atomiste. Numai pozitivistii, care au pretenția că filozofia lor este pur științifică, au dat un răspuns la întrebarea noastră. Punctul lor de vedere (Jordan, 1936) este chiar încă mai radical decît cel al lui Dirac. În timp ce acesta se mulțumește cu formule și nu se interesează de loc de chestiunea privitoare la existența unei lumi obiective, pozitivismul declară că acest fel de a pune întrebarea este în genere lipsit de sens. Din punctul de vedere al pozitivistilor, nu are sens nici o întrebare care nu poate fi decisă pe cale experimentală. După cum am amintit în introducere, această atitudine s-a dovedit fructuoasă în măsura în care i-a determinat pe fizicieni să ia o poziție critică față de ideile preluate prin tradiție, și prin aceasta a contribuit la construirea teoriei relativității și a teoriei cuantelor. Dar cu ceea ce nu pot fi de acord este această poziție pur pozitivistă față de problema realității în genere. Dacă toate reprezentările pe care le folosește o anumită știință a naturii ar proveni în mod exclusiv din știința respectivă, atunci pozitivistii ar avea dreptate. Dar atunci n-ar mai exista nici o știință a naturii. Deși, fiind dată o sferă închisă a unei ramuri a științei, s-ar putea exclude orice referire la alte ramuri, aceasta nu poate avea loc niciodată pentru interpretarea filozofică a cunoașterii; or, problema existenței unei lumi obiective se încadrează aici.

Pozitivismul pornește de la presupunerea că singurele afirmații evidente în mod nemijlocit descriu percepții senzoriale nemijlocite. Toate celelalte afirmații ar fi construcții teoretice indirecte, care servesc la descrierea cît mai pe scurt posibil a conexiunilor și relațiilor dintre aceste experiențe primare. Numai acestora le-ar reveni caracterul

de realitate, pe cînd afirmațiile secundare indirecte nu ar corespunde la nimic real și nu ar avea nimic de-a face cu problema existenței lumii exterioare. Ele ar fi doar convenții artificiale, născocite pentru ordonarea economică și simplificarea fluxului de percepții senzoriale care ne inundă.

Această atitudine nu-și găsește în nici un caz justificarea în științele naturii și nimeni nu poate dovedi caracterul său corect cu ajutorul unor metode științifice. Eu aș spune că ea este de origine metafizică, dacă nu m-aș teme să nu rănesc în acest fel sentimentele pozitivistilor, care au pretenția că filozofia lor este pe deplin nemetafizică. Dar eu pot totuși afirma că atitudinea lor se bazează pe psihologie, numai că aceasta nu este o psihologie sănătoasă. Să considerăm cîteva exemple din viața de toate zilele. Dacă eu mă uit la această masă sau la acest scaun, obțin numeroase percepții senzoriale — pete de culoare —, iar dacă îmi mișc capul, aceste impresii se schimbă. Dacă voi atinge aceste obiecte, atunci voi obține iar un mare număr de noi percepții senzoriale, impresii diferite de rezistență, duritate, căldură, ș.a.m.d. Dacă însă vrem în mod cinstit să ne dăm seama de ceea ce se întîmplă, atunci trebuie să recunoaștem că în realitate nu examinăm aceste impresii neordonate, ci obiectul în întregul său: masa sau scaunul. Are loc un proces de combinare inconștientă, și ceea ce observăm în realitate este o totalitate care nu este egală cu suma percepțiilor senzoriale separate, ci ceva nou. Un exemplu acustic va limpezi poate mai bine unde vreau să ajung: o melodie este în mod precis altceva decît suma sunetelor din care se compune — ea este o unitate nouă.

Psihologia modernă este pe deplin conștientă de acest fapt. Am în vedere aici psihologia configurațiilor (*Gestalt Psychologie*) a lui von Ehrenfels, Köhler și Wertheimer. Cuvîntul configurație nu înseamnă aici numai forma exterioară, ci totalitatea percepută în realitate. Să ne gîndim, în legătură cu aceasta, din nou la exemplul nostru cu melodia. Aceste configurații se formează la noi în mod inconștient. Dacă le observăm în mod conștient, atunci ele se transformă în concepte și capătă denumiri. Rațiunea naivă consideră că aceste configurații nu sînt produse arbitrare ale imaginației sale, ci impresii provocate de lumea exterioară; iar eu nu văd nici un temei de a renunța la această

convingere în domeniul științelor naturii, deoarece știința nu este decît aplicarea inteligenței umane obișnuite, sănătoase, la condiții neobișnuite. Pozitiviștii spun că această presupunere a existenței unei lumi exterioare ne-ar duce în domeniul metafizicii și că ar fi un enunț lipsit de sens, deoarece noi nu vom putea afla niciodată ceva despre lume decît prin intermediul senzațiilor noastre. La aceasta nu se poate replica nimic. Kant a exprimat aceeași idee, atunci cînd a deosebit lucrul empiric de „lucrul în sine”, care se află la baza sa. Dacă însă pozitiviștii merg mai departe și afirmă în continuare că toate afirmațiile noastre despre lumea exterioară sînt numai simbolice și au numai un sens bazat pe convenție, atunci protestez. Pentru că atunci orice propoziție ar fi spusă numai simbolic, chiar și o afirmație atît de simplă ca „eu stau aici pe un scaun”. Scaunul nu este o senzație primară, ci este o *configurație*, o cuprindere laolaltă a senzațiilor care se petrec în mod inconștient și conduce la o unitate nouă, independentă de variațiile acestor senzații. Dacă-mi mișc corpul, mîinile sau ochii, atunci senzațiile mele se modifică într-un mod foarte complicat, pe cînd scaunul rămîne același. Scaunul este un invariant față de modificările mele sau chiar ale altor lucruri și persoane, pe care le percepem drept configurații. Acest fapt de „invariantă”, care este foarte evident, este ceea ce avem în vedere atunci cînd spunem că există „în realitate” un scaun. Aceasta se poate verifica dacă nu printr-un experiment fizic, totuși cu ajutorul unor metode minunate ale rațiunii noastre naive, inconștiente, aptă de a deosebi printr-o simplă mișcare a capului între un scaun „adevărat” și unul pictat. Întrebarea cu privire la realitate nu este deci lipsită de sens, iar folosirea acestui cuvînt nu este numai simbolică sau convențională.

Expresia „invariant”, pe care am mai folosit-o în legătură cu teoria relativității și care aici e utilizat într-un sens mai general, constituie veriga de legătură dintre aceste considerente psihologice și științele exacte. Este o expresie matematică, care a fost folosită mai întîi în geometria analitică pentru determinarea cantitativă a configurațiilor spațiale, care reprezintă corpuri simple sau mulțimi de asemenea corpuri. Orice figură geometrică poate fi descrisă cu ajutorul unui număr suficient de mare de coordonate ale

punctelor sale ; de exemplu, prin proiectarea punctelor sale pe trei plane ortogonale. Dar atunci se obțin date de prisos, căci coordonatele determină nu numai forma geometrică, ci simultan și poziția sa față de cele trei plane alese arbitrar, ceea ce este cu totul inutil. De aceea, este necesar să se elimine din descrierea analitică tot ce e neesențial, recurgîndu-se la un procedeu matematic binecunoscut, care are ca rezultat obținerea așa-numiților invarianți care descriu numai ce e esențial la figura considerată.

Același lucru rămîne valabil și atunci cînd nu avem de-a face numai cu forma geometrică și volumul, dar și cu culoarea, căldura și cu alte proprietăți fizice. Metodele fizicii teoretice sînt aceleași cu cele ale geometriei. Aici se pornește, de asemenea, de la coordonate generalizate și se elimină apoi neesențialul, întîmplătorul. Din această categorie face parte nu numai poziția spațială, ci și mișcarea, starea de electrizare ș.a.m.d. Ceea ce rămîne sînt invarianții care descriu obiectul.

Această metodă este echivalentul exact pentru ceea ce realizează gîndirea inconștientă a omului neîmbolnăvit de știință, atunci cînd formează configurații. Metoda științifică depășește pe cea naivă numai în măsura în care procedeele sale sînt mai rafinate. Avem de-a face cu formații necunoscute, pentru care nu mai ajunge acțiunea inconștientului. În cazul unei observații științifice, adesea nu este clar ce anume percepem. Ca să ne dăm seama despre ce e vorba, e nevoie de o meditare profundă, de modificarea condițiilor de experimentare, stabilirea unor ipoteze, măsurători și calcul neobosit. Rezultatul este o teorie matematică pentru reprezentarea unor fapte bazate pe informații noi. Invarianții care apar în această teorie pot fi considerați însă pe drept cuvînt ca reprezentări ale obiectelor din lumea reală. Singura deosebire dintre aceste obiecte și cele ale vieții de toate zilele constă în faptul că unele iau ființă în mod inconștient, pe cînd celelalte, printr-o gîndire științifică conștientă. Astăzi, cînd reprezentările *freudiene* cu privire la sfera inconștientului au devenit universal valabile, această deosebire dintre obiectele vieții de toate zilele și cele ale cercetării științifice poate fi considerată, fără multă vorbă, ca subordonată. Acest punct de vedere este cu atît mai îndreptățit, cu cît granița dintre

cele două domenii nu poate fi trasă cu precizie și se află într-o continuă mobilitate. Reprezentări care înainte erau construcții pur științifice, s-au transformat în realități. Odi-noară, stelele erau pentru oamenii primitivi puncte luminoase pe bolta cerească. Știința a arătat însă formele și traiectoriile lor geometrice, și din această cauză s-a izbit la început de o opoziție fanatică. Galilei însuși a fost un martir în lupta pentru adevăr. Astăzi, aceste observații matematice au devenit materii obișnuite de învățămînt pentru copiii de școală și se încadrează în bagajul firesc de cunoștințe ale fiecăruia. Ceva asemănător s-a întîmplat și în domeniul electricității, cu reprezentările despre cîmp.

Spre marea mea satisfacție, ideea care mi s-a impus în mod insistent, că invarianții constituie veriga de legătură între gîndirea naivă și cea științifică, a fost dezvoltată în fizologia matematicii a lui Hermann Weyl (1926). Ea este în concordanță, după cît mi se pare, și cu concepțiile lui Niels Bohr (1933). Bohr a sublinat adesea că dificultățile conceptuale din fizică provin de acolo că sîntem siliți să folosim cuvinte și reprezentări ale vieții de toate zilele, chiar și atunci cînd avem de-a face cu observații mai subtile. Pur și simplu, nu ne stă la dispoziție nici un alt mod de descriere a mișcării decît prin cuvinte care se referă fie la reprezentarea corpusculară, fie la cea ondulatorie. Și în felul acesta sîntem siliți să le aplicăm și acolo unde experimentul arată că nu sînt cu totul adecvate sau că avem de-a face în realitate cu fenomene mai generale. Introducem pe cale matematică invarianții necesari pentru descrierea observațiilor noi și învățăm treptat să-i utilizăm în mod intuitiv. Este un proces extrem de lent, care progresează numai în măsura în care noile fenomene devin cunoscute cercurilor largi. Atunci noile reprezentări se cufundă, în sfîrșit, în subconștient, găsesc denumiri adecvate și trec în tezaurul general de cunoaștere al omenirii.

În teoria cuantelor ne aflăm de-abia la începutul acestui proces, și tocmai de aceea este greu să găsim expresii uzuale pentru a descrie pe scurt cu ce fel de realitate avem de-a face aici. Pot să dezvolt doar trăsăturile invariante ale acestei teorii și să încerc să le descriu prin cuvinte obișnuite, folosind pe lîngă aceasta expresii noi, de fiecare dată cînd o reprezentare începe să acționeze asupra

puterii noastre intuitive de a concepe lucrurile. Iată ce are de îndeplinit învățămîntul în domeniul fizicii. Studentul tînr, bine pregătit, ia ca de la sine înțelese lucruri care nouă ni se pare îngrozitor de grele, iar generațiile de mai tîrziu vor vorbi despre atomi și cuante cu aceeași ușurință cu care noi vorbim despre acest scaun și această masă, și despre stelele de pe cer. Nu am însă intenția să minimalizez prăpastia dintre fizica clasică și cea modernă. Ideea, după care e posibil să descrii aceleași fenomene cu ajutorul a două imagini cu totul deosebite, care aparent se exclud reciproc, fără a ne expune cu toate acestea riscului de a ajunge la contradicții logice, este cu siguranță ceva cu totul nou în științele naturii. Bohr subliniază că această idee nouă ar putea eventual să ne ajute să rezolvăm și anumite dificultăți fundamentale din biologie și psihologie. O ființă vie, plantă sau animal, reprezintă cu siguranță un sistem fizico-chimic, dar este în același timp mai mult decît atît. Aici întîlnim iarăși două moduri de abordare a problemelor. A trecut epoca materialismului *. Sîntem convinși că modul fizico-chimic de a privi lucrurile nu mai ajunge în nici un caz pentru reprezentarea faptelor vieții, fără a mai vorbi despre manifestările spiritului. Totuși, există o legătură foarte strînsă între cele două feluri de a privi lucrurile, care se acoperă și se întrepătrund într-un mod extrem de complicat. Manifestările vieții și ale spiritului necesită pentru descrierea lor cu totul alte concepte și reprezentări decît procesele fizico-chimice, cu care sînt conexe. Nu trebuie oare să ajungă în contradicție aceste moduri deosebite de descriere a lucrurilor? Bohr a recomandat ideea după care și acesta ar fi un caz de complementaritate, la fel ca în cazul particulelor și undelor din fizică. Dacă un anumit proces biologic sau psihologic este cercetat cu metode fizice și chimice, atunci trebuie să fie utilizate diferite aparate fizice, care tulbură procesul. Cu cît mai mult vom afla cu această ocazie despre atomi și molecule, cu atît vom fi mai puțin siguri că observăm într-adevăr procesul de viață pe care vrem să-l cercetăm și, înainte de a fi aflat totul cu

* Max Born nu specifică despre ce materialism este vorba dar din context se subînțelege în mod evident materialismul mecanicist (N.R.).

privire la atomi, s-ar putea ca viețuitoarea respectivă să fie de-acum moartă, din cauza manipulațiilor la care a fost supusă. Această indicație este suficientă pentru a lăsa în minte ideea lui Bohr cu privire la o relație complementară nouă și mai profundă între fizică și viață, ca și între corp și spirit.

Vechea năzuință de a descrie întreaga lume într-un limbaj filozofic unitar este nerealizabilă. Mulți au simțit acest lucru, dar este meritul fizicii moderne de a fi arătat relația logică exactă dintre două moduri aparent incompatibile de a descrie lucrurile și de a le fi adus în concordanță pe un plan superior.

Dar fizica nu se poate opri la acest rezultat. El aparține unei epoci trecute, și de atunci au ieșit la iveală noi dificultăți. Observațiile asupra nucleului atomic au descoperit o lume nouă, de dimensiuni extrem de mici, în care se impun legi ciudate. Acuma știm că fiecare atom posedă un nucleu de o anumită structură, care conține două feluri de particule, protoni și neutroni, într-o strânsă îmbinare. Protonul este nucleul cu sarcină pozitivă al atomului celui mai ușor, atomul de hidrogen, în timp ce neutronul este o particulă de aproximativ aceeași masă, dar fără sarcină. În atomul neutru, nucleul este înconjurat de un nor de electroni, care compensează sarcina pozitivă a nucleului. Electronii, amintiți deja de mai multe ori, sînt particule care au o masă de aproape 2 000 de ori mai mică decît protonii, respectiv neutronii. Ele sînt încărcate negativ, iar sarcina lor este egală și de semn contrar cu sarcina protonului. Există, de altfel, și electroni pozitivi sau pozitroni, a căror existență a fost prezisă de Dirac pe baza unor reflexii teoretice ; ele au însă doar o scurtă durată de viață, după cum se va arăta imediat. Avem deci patru tipuri de particule extrem de mici, două «grele», protoni și neutroni, și două «ușoare», electronul negativ și cel pozitiv, care toate se pot mișca cu o viteză arbitrară mai mică decît viteza luminii. Afară de acestea, mai există și fotoni, care se pot mișca cu viteza luminii, și probabil încă o altă particulă, așa-numitul neutrino, care se mișcă de asemenea numai cu viteza luminii. Fizica modernă pune astăzi întrebarea : de ce tocmai acestea sînt particulele cele mai mici și nu al-

tele?¹ Exprimată astfel, această întrebare sună destul de neprecis, dar ea are totuși la bază un sens foarte precis. De pildă, s-a stabilit că valoarea raportului masei protonului și electronului este de 1 836,2. Un alt număr fără dimensiuni este de 137,03, care stabilește o legătură între sarcina electronului, constanta h a lui Planck și viteza luminii. Fundarea teoretică a acestor numere este o sarcină urgentă, numai că o asemenea teorie nu există. Ea ar trebui să studieze legăturile dintre particulele elementare. A fost făcută descoperirea fundamentală că un electron pozitiv și unul negativ se pot uni ; cu această ocazie, ei dispar pur și simplu, iar energia care se eliberează o dată cu acest proces este iradiată sub formă de fotoni. Tot așa se poate naște, invers, o asemenea pereche de electroni din lumină : procese de acest fel, adică transformări ale particulelor celor mai mici, inclusiv nașterea și moartea, devenirea și pieirea, par să fie cheia pentru o înțelegere mai profundă a ceea ce este de fapt materia. În laboratoarele noastre putem genera asemenea procese de transformare numai într-o măsură foarte mică, dar materia însăși ne furnizează un material bogat de experimentare, în așa-numitele radiații cosmice. Dacă le observăm pe acestea, devenim martorii unor catastrofe, în cursul cărora prin ciocnirea a două particule rezultă o grămadă de particule noi, o „aversă“, cum se spune. Se pare că aici am ajuns la granița la care reprezentarea materiei, ca fiind constituită din particule elementare clar deosebite, își pierde sensul și se pare că mai înainte ca dezvoltarea unei teorii fizice satisfăcătoare să fie posibilă va trebui să renunțăm la încă un principiu filozofic acceptat pînă acum ca bine întemeiat.

Este foarte tentant să cercetăm în continuare care ar fi semnificația situației actuale a cunoștințelor noastre de fizică. Din păcate, nu este posibil în cadrul acestei expunerii. Scopul ei a fost să vă arate că fizica, făcînd cu totul abstracție de importanța sa pentru viața practică, în calitatea sa de știință care se află la baza oricărei dezvoltări

¹ De la data cînd a fost ținută această expunere, cu 20 de ani în urmă, au mai fost găsite multe alte particule elementare : neutrino, antiprotoni, antineutroni, mezonii și hiperoni de diferite tipuri. Întrebarea pusă în text rămîne plină de sens și pentru acest domeniu mai mare de fapte.

tehnice, are ceva de spus și cu privire la chestiunile cu totul abstracte ale filozofiei. Am devenit de-a dreptul sceptici față de valoarea reală a progresului tehnic, care s-a întins dincolo de scopul său și utilitatea sa propriu-zisă. Prin aplicarea rezultatelor cercetărilor din fizică, lumea socială și-a pierdut echilibrul. Dar omul din vest, spre deosebire de orientalul mai contemplativ, îi place viața periculoasă, iar fizica este una dintre aventurile sale.

Nu putem opri dezvoltarea sa, dar putem încerca să-i dăm un conținut autentic filozofic : căutarea adevărului de dragul lui însuși.

Bibliografie

- Bohr N. (1933), *Lumină și viață*, în „Naturw. 21, p. 245.
- Jordan P. (1936), O strălucită descriere a modului pozitivist de a privi lucrurile se găsește în cartea sa *Teoria cuantică intuitivă*, J. Springer, Berlin.
- Weyl H. (1926), *Filozofia matematicii și a științelor naturii*, Manual de filozofie, P. II, A. 11. Ediția îmbunătățită, în limba engleză, a acestei cărți a apărut sub titlul *Philosophy of Mathematics and Natural Sciences*, Princeton University Press, 1949.
- March A. (1956), *Cunoașterea fizică și granițele sale*, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.

6

Cauză, scop și economie

*în legile naturii**

(Principiile de minim ale fizicii)

Fără a avea pretenția de a fi un cunoscător al antichității clasice, cred că o problemă de felul celei pe care vreau să o tratez aici s-a ivit pentru prima dată în literatură în *Eneida* lui Virgiliu, în cartea întâi, versul 368, unde apar cuvintele „*taurino quantum possent circumdare Tergo*”.

Zosias, scriitor grec din epoca târzie, povestește pe larg următoarele: *Didona*, sora regelui *Pygmalion*, un tiran crunt din orașul fenician *Tyrus*, care și-a omorât soțul, s-a văzut silită să fugă împreună doar cu un mic număr de partizani. Ea a debarcat pe locul Cartaginei de mai târziu. Ajunsă aici, atunci când a vrut să dobândească pământ de la locuitori, aceștia i-au oferit, în schimbul banilor ei, numai atît cît putea să cuprindă cu pielea unui bou. Femeie înțeleaptă, ea a tăiat pielea în fîșii înguste, le-a unit capetele formînd o funie lungă, cu care a putut cuprinde o porțiune considerabilă de pământ, nucleul regatului ei de mai târziu. Pentru a-și atinge scopul, ea avea de rezolvat în mod evident o problemă matematică și anume vestita problemă a *Didonei* : care curbă închisă, de o lungime dată, circumscrie suprafața cu aria cea mai mare ?

Nu știm cum a abordat ea problema, prin încercări, pe cale logică sau intuitiv. În orice caz, nu este greu de ghicit că răspunsul corect este cercul. Dar demonstrația matematică a acestui fapt a fost găsită de-abia cu ajutorul metodelor matematice moderne.

* Expunere ținută la *Royal Institution of Great Britain* la 10 februarie 1939. A apărut pentru prima dată în „*Proc. Roy. Inst.*”, vol. XXX, partea a III-a, 1939.

Cînd am spus că citatul de mai sus este prima mențiune despre o problemă de acest fel în literatură, desigur că n-am vrut să afirm că niciodată înainte n-au apărut în viața omului probleme de maxim sau minim. În realitate, orice încercare de a atinge un anumit scop practic cu ajutorul gîndirii logice este mai mult sau mai puțin o încercare de a rezolva o problemă de acest fel. Depunînd un anumit efort, vrem să obținem efectul maxim, și invers, urmărim un anumit rezultat cu un minim efort. Din această dublă formulare a aceleiași probleme ne dăm seama că nu există nici o deosebire esențială între maxim și minim, așa că putem vorbi doar despre valori extreme și probleme de extreme. În lumea afacerilor se folosește cuvîntul economie pentru eforturile de a scoate cel mai mare profit în cazul investiției unei anumite sume, respectiv, de a obține un anumit profit cu cea mai mică cheltuială de mijloace. Un comandant militar se va strădui să cucerească o poziție strategică cu cele mai mici pierderi din partea sa și cu cele mai mari din partea dușmanului — un procedeu care se numește, cu o expresie destul de notorie, „economie de material uman“. Aceste exemple sînt menite să arate cum se bazează *problemele de extremum* pe reprezentări care derivă din dorințe, pasiuni și nevoi omenești. Scopurile dorite în mod fierbinte sînt adesea pe deplin iraționale, dar o dată recunoscute ca scopuri, duc la o chestiune cu totul rațională, rezolvabilă cu ajutorul logicii și al matematicii. Toată viața noastră constă din acest amestec curios de sens și absurditate : obținerea pe cale rațională a unor scopuri îndoielnice. Să considerăm, de exemplu, sistemul nostru de drumuri : îndeplinește el oare cerința rațională de a crea cele mai scurte distanțe între centrele populate ? Sigur că nu. Dispunerea străzilor este rezultatul mai mult sau mai puțin rațional al condițiilor geografice, istorice și economice, care ele însele sînt adesea orice altceva decît raționale.

Aici însă nu vrem să analizăm comportarea oamenilor, ci legile naturii. Ideea că există asemenea legi și că ele pot fi formulate în mod rațional este un rod relativ tîrziu al tezaurului de gîndire al omenirii. Popoarele antichității au dezvoltat doar puține ramuri ale științelor naturii, înainte de toate geometria și astronomia, ambele în

scopuri practice. Geometria își are originea în măsurarea pământului și arhitectură, astronomia pornește de la calendar și navigație.

Științele naturii, în sens modern, au început de-abia o dată cu întemeierea mecanicii de către Galilei și Newton.

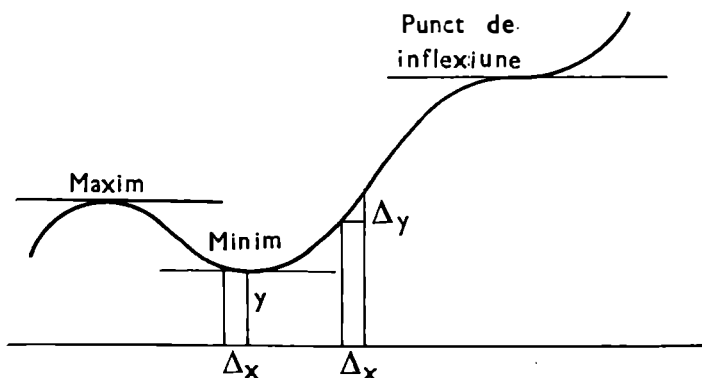


Fig. 1 — Maxim, minim, punct de inflexiune

Ceea ce i-a caracterizat înainte de toate pe acești mari gânditori a fost capacitatea de a se elibera de tradițiile metafizice ale timpului lor și de a exprima rezultatele observațiilor și experimentelor într-un nou limbaj matematic, fără a lua în considerație părerile filozofice preconcepute. Cu toate că Newton a fost și un mare teolog, legile mișcării, pe care le-a formulat, nu au nimic de-a face cu ideea că mișcarea planetelor ar putea fi o dovadă pentru un scop precis indicabil. Dar încă în timpul vieții lui Newton, spre sfârșitul secolului al XVII-lea, probleme geometrice și analitice de *extremum* au trezit pentru prima dată interesul matematicienilor și în curând, după moartea lui Newton, în anul 1727, ideea metafizică despre scop și economie în natură a fost conexată cu aceste probleme.

Însă, înainte de a vă vorbi despre dezvoltarea istorică, aș vrea să mă opresc pe scurt la anumite probleme geometrice; un exemplu de asemenea problemă este cea amintită în introducere, cu privire la cumpărarea pământului de către Didona.

Un vîrf de munte, un fund de vale sînt exemple de maxime și minime, iar o secțiune verticală a unui lanț de munți, așa cum arată și fig. 1, reprezintă cea mai simplă curbă matematică cu puncte extreme. Vedem că tangenta la curbă trece orizontal prin asemenea puncte. După cum

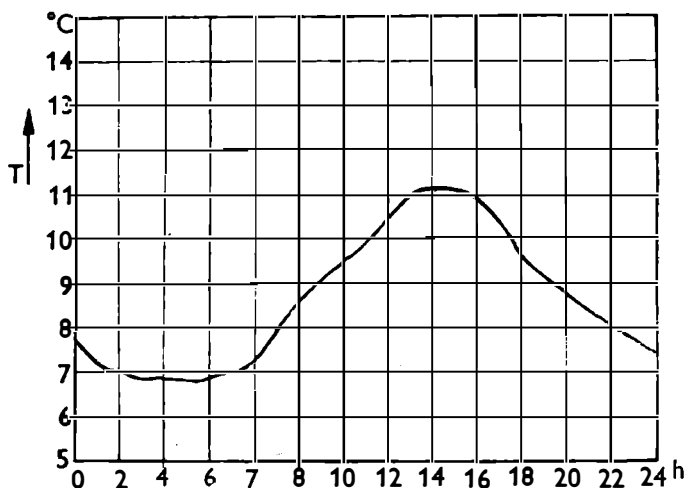


Fig. 2—Schimbarea temperaturii în cursul unei zile

se vede din grafic, există și alte puncte cu tangente orizontale, așa-numitele puncte de inflexiune. O caracteristică comună a tuturor acestor puncte este că nivelul din imediata lor vecinătate e staționar; adică el se schimbă mult mai încet decât dacă punctul s-ar afla pe o pantă.

Toată lumea cunoaște metoda grafică, cu ajutorul căreia se reprezintă variația unei mărimi printr-o curbă pe un grafic de coordonate, ca de pildă variația zilnică a temperaturii (fig. 2). Curba indică un maxim imediat după-amiază și un minim dis-de-dimineață.

Să admitem acum că Didona a vrut să ridice pe terenul ei o clădire dreptunghiulară cu o bază cît se poate de mare. Aceasta înseamnă o mare simplificare a problemei pentru ea, căci acum nu mai trebuie să facă alegerea dintre toate curbele închise posibile, ci numai dintre toate

dreptunghiurile cu perimetrul dat, și anume să aleagă dreptunghiul cu aria maximă. Figura 3 arată câteva asemenea dreptunghiuri; dintre ele, pătratul are evident aria maximă.

Aceasta este forma cea mai simplă a așa-numitei pro-

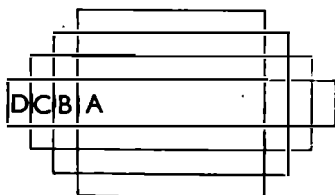


Fig. 3 — Dreptunghiuri cu perime-tre egale și cu suprafețe diferite.

Laturile	Perimetrul	Suprafața
(A) 4×4	$2 \times (4 + 4) = 16$	16
(B) 3×5	$2 \times (3 + 5) = 16$	15
(C) 2×6	$2 \times (2 + 6) = 16$	12
(D) 1×7	$2 \times (1 + 7) = 16$	7

bleme isoperimetrice (de la grecesul *iso* = egal, *peri-meter* = perimetru), iar problema Didonei reprezintă cazul său general. În zilele noastre, matematicienii desemnează totuși cu acest nume toate tipurile de probleme, în care trebuie să se determine o valoare extremă în condiții restrictive, așa cum în exemplul de mai sus se cere suprafața de arie maximă în cazul perimetrului dat. În general, cele două mărimi considerate pot fi intervertite; în acest caz, punctul maxim al unei mărimi corespunde unui punct minim al celeilalte. Astfel, de pildă, e clar că un pătrat este totdeauna dreptunghiul cu perimetrul minim, când aria este dată (fig. 4), și că același lucru e valabil pentru cerc, în comparație cu toate celelalte curbe închise.

Un alt tip de probleme *de extremum* se referă la conceptul de cea mai scurtă legătură. Cazul cel mai simplu este problema determinării pe o dreaptă L a unui punct Q , care se află la distanța cea mai scurtă de un alt punct dat P , care nu se găsește pe L (fig. 5). Q este în mod evident piciorul perpendicularei sau normalei din P pe

dreapta L . Nu tot atât de evidentă este însă și problema stabilirii pe o dreaptă L a unui punct Q , pentru care suma distanțelor $P_1Q + P_2Q$, de la punctele P_1 și P_2 , aflate în afara dreptei, să fie minimă. Dacă P_1 și P_2 nu se află de aceeași parte a dreptei, atunci rezolvarea e banală ;

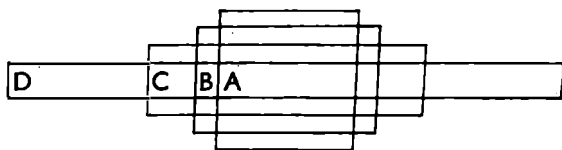


Fig. 4 — Dreptunghiuri cu suprafețe egale și cu perimetre diferite.

<i>Laturile</i>	<i>Suprafața</i>	<i>Perimetrul</i>
(A) 4×4	16	$2 \times (4 + 4) = 16$
(B) $3 \times 5,34$	16	$2 \times (3 + 5,34) = 16,7$
(C) 2×8	16	$2 \times (2 + 8) = 20$
(D) 1×16	16	$2 \times (1 + 16) = 34$

Q este punctul de intersecție al lui L cu dreapta P_1P_2 (fig. 6 a). Dacă însă P_1 și P_2 se află de aceeași parte a lui L , atunci rezolvarea este de asemenea simplă, dacă ne gândim că fiecărui punct P_2 , de pe o parte a lui L , îi corespunde un punct simetric P_2' de cealaltă parte a sa. Atunci Q este punctul de intersecție a lui P_1P_2' cu L (fig. 6 b). Această construcție a punctului simetric dă primul exemplu de aplicare în fizică a unei probleme geometrice de acest fel. Căci dacă L ar fi o oglindă, atunci o rază de lumină plecată de la P_1 și reflectată în P_2 ar corespunde rezolvării date. În consecință, acest lucru e identic cu legea reflecției luminii, numai că aici am exprimat-o ca un principiu de minim : o rază de lumină alege punctul de reflecție Q astfel, încît întregul drum al luminii $P_1Q + QP_2$ să fie cît mai scurt posibil. Să demonstrăm acest lucru cu un model mecanic : punctul Q este un mic șuber, care alunecă de-a lungul unei bare L , iar raza de lumină e reprezentată printr-un șnur, care e fixat în P_1 , trece prin Q , iar celălalt capăt îl țin eu în mîină. Dacă trag de șnur, atunci Q se așează în așa fel, încît P_1Q și P_2Q , în concordanță cu legile reflecției, formează același unghi cu L . Lumina se comportă așa, de parcă fiecare rază

ar avea tendința să se contracteze. Naturalistul francez Fermat a dovedit că toate legile opticii geometrice pot fi reduse la acest principiu. Lumina se comportă ca un mesager obosit care, dacă e trimis într-un anumit loc, alege întotdeauna cu grijă drumul cel mai scurt. Să considerăm

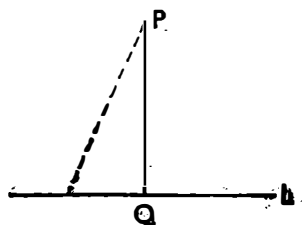


Fig. 5

această interpretare ca întâmplătoare sau să-i atribuim o semnificație metafizică mai profundă? Înainte de a ne forma o opinie în această privință, trebuie să obținem mai multe date și să considerăm alte cazuri asemănătoare.

Să ne reîntoarcem la exemplele geometrice. Până acum am admis numai linii drepte de legătură între diferite

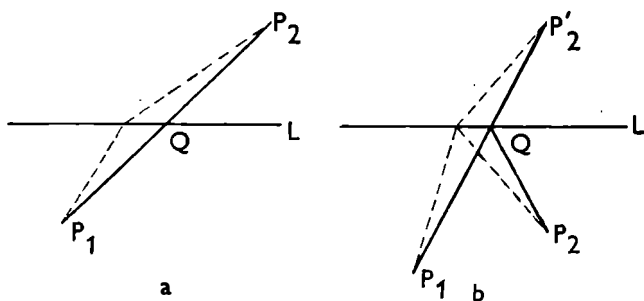


Fig. 6

puncte sau, ca în ultimul exemplu, linii de legătură compuse din drepte. Totuși, aceasta nu este o restricție necesară, și dacă acum renunțăm la ea, atacăm un alt domeniu, de care ține în realitate problema propriu-zisă a Didoinei, adică cazurile în care traiectoria unei curbe trebuie

să fie determinată pe baza condiției ca o anumită mărime să ia o valoare extremă.

Cea mai simplă întrebare de acest tip este : de ce este dreapta legătura cea mai scurtă dintre două puncte date, A și B ? Aici ne aflăm într-o ramură mai înaltă a mate-

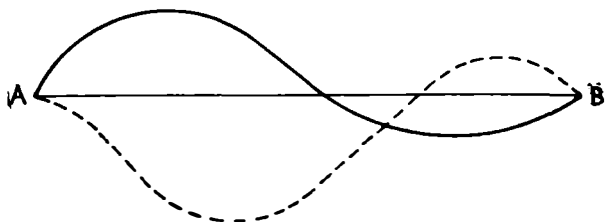


Fig. 7

maticii, într-un domeniu cu posibilități mai largi, pe care îl numim calculul variațiilor. Acum trebuie să comparăm între ele lungimile tuturor curbelor, care pot fi trase prin cele două puncte A și B , deci o infinitate de obiecte, care de data aceasta nu mai sînt puncte, ci figuri geometrice (fig. 7). Este unul dintre marile triumfuri ale spiritului omenesc de a fi dezvoltat metode, în vederea biruirii acestor probleme aparent imposibile.

Niciodată nu vom putea călători pe pămîntul nostru pe o linie perfect dreaptă, deoarece suprafața pămîntului nu este plană. Cel mai bun lucru ce putem face este să urmăm un cerc din cele mai mari, adică linia de intersecție a suprafeței pămîntului cu un plan, pe care îl gîndim ca trecînd prin centrul său. Se poate arăta că pe suprafața unei sfere, drumul cel mai scurt dintre două puncte A și B , care nu se află la capetele opuse ale unui diametru, adică nu sînt antipodi, este arcul unui cerc mare ce trece prin A și B , mai exact, cel mai scurt dintre cele două arce care trec prin ele. Vasele de pe mare trebuie să călătorească pe asemenea cercuri mari.

Dumneavoastră știți că globul pămîntesc nu este în realitate chiar o sferă, ci că este turtit la poli și umflat la ecuator. Cum rămîne atunci cu drumul cel mai scurt pe o asemenea suprafață ?

Au trecut mai bine de 100 de ani de cînd marele matematician din Göttingen, Karl Friedrich Gauss, s-a lovit

de această problemă, cu ocazia măsurării patriei sale, regatul Hanovrei. Deoarece el nu a fost numai un topometru, ci unul dintre cei mai mari gânditori ai tuturor timpurilor, el a atacat problema dintr-un punct de vedere general, prin faptul că a căutat să stabilească liniile cele mai scurte pe suprafețe oarecare; în amintirea punctului de plecare al întrebării sale, el a denumit aceste linii, linii geodezice. Aș vrea să mă opresc aici ceva mai mult la aceste linii și la proprietățile lor, avînd în vedere că ele sînt pentru fizică de mare importanță, din mai multe puncte de vedere.

Cercetările sale l-au condus pe Gauss la descoperirea geometriei neeuclidiene. De obicei, această descoperire este atribuită matematicianului rus Lobacevski și matematicianului ungar Bolyai, și anume, pe drept cuvînt, pentru că acești cercetători au publicat în jurul anului 1830, independent unul de altul, primul sistem al unei geometrii neeuclidiene. Dar descoperirea jurnalului lui Gauss în anul 1899, cu mulți ani după moartea sa, precum și adunarea la un loc și publicarea corespondenței sale au dezvăluit că un mare număr dintre descoperirile matematice importante, din prima jumătate a secolului al XIX-lea, au fost făcute, încă mai înainte, de Gauss; printre altele, și o teorie completă a spațiului neeuclidian. El nu a publicat aceste descoperiri, pentru că, după cum îi scria unui prieten, îi era teamă de „strigătele beoțienilor”. Demonstrarea posibilității de a construi o geometrie, diferită de cea euclidiană, a însemnat un mare pas înainte în dezvoltarea științelor moderne ale naturii, căci ea a condus la interpretarea empirică a geometriei ca ramură a fizicii, care studiază proprietățile de formă și poziție ale solidelor rigide. Prin lucrările lui Riemann și ale lui Einstein, geometria și fizica s-au contopit treptat într-o unitate. Dar chiar dacă facem abstracție de această dezvoltare importantă, studiul liniilor geodezice ne mai învață și altele și ne clarifică cu privire la natura diferitelor tipuri de legi fizice și deci cu privire la tema noastră, despre cauză, scop și economie în natură.

Să considerăm acum un punct P pe o suprafață dată (fig. 8) și toate curbele prin P , care au în P aceeași di-

recție. Este limpede că una dintre acestea trebuie să fie „curba cea mai dreaptă”, adică cea cu curbura minimă. Pentru a vă prezenta o asemenea curbă, am adus aici modelul unei suprafețe convexe, pe care sînt fixate două bucle, prin care trece mai întîi o coardă de pian. Datorită

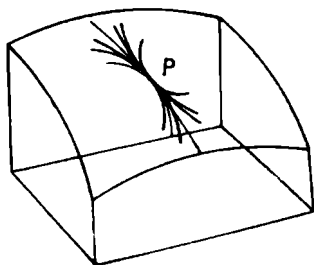


Fig. 8—Linii cu curburi minime pe o suprafață.

elasticității sale, aceasta opune rezistență față de orice deformare, și de aceea va lua forma cea mai dreaptă posibilă pe suprafața respectivă. Dacă voi trece acum prin buclă o sfoară și o întind tare, atunci ea va urma, bineînțeles, drumul cel mai scurt posibil pe această suprafață, între cele două puncte, astfel încît vedem că legătura cea mai scurtă și legătura cea mai dreaptă coincid.

O linie geodezică poate fi astfel recunoscută prin două proprietăți de minim, în mod esențial deosebite : una poate fi numită proprietate locală sau diferențială, constînd în faptul că are cea mai mică curbura, dintre toate curbele cu o direcție dată, ce trece prin punctul dat, pe cînd cealaltă poate fi denumită proprietate globală sau integrală, constînd în faptul că ea (linia geodezică) reprezintă legătura cea mai scurtă între două puncte date pe suprafața respectivă.

Acest dualism al legilor „locale” și „globale” nu iese la iveală numai aici, în acest exemplu geometric simplu, ci găsește o aplicare mult mai cuprinzătoare în fizică. Aici este rădăcina disputei vechi, dacă forțele fizice acționează direct la distanță, așa cum admite Newton în a sa teorie a gravitației, și după cum se presupune, de asemenea, în accepțiunile mai vechi ale teoriei electricității și a magne-

tismului, sau dacă aceste forțe acționează numai din aproape în aproape, ipoteză care stă la baza teoriei electromagnetismului a lui Faraday și Maxwell, precum și a tuturor teoriilor moderne ale câmpului. Poate că acest lucru va deveni mai clar, dacă concepem legea liniilor geodezice ca lege fizică, îndeosebi ca lege a mișcării. Prima lege a mișcării, stabilită de Newton, *principiul inerției*, afirmă că orice particulă se mișcă în linie dreaptă, dacă forțe exterioare nu exercită o influență asupra ei. O bilă de biliard va descrie o linie dreaptă, dacă masa e așezată perfect orizontal, astfel încît forța gravitației să fie ineficientă. Să ne închipuim acum o mare înghețată, care e atît de întinsă, încît curbura suprafeței pămîntului poate fi observată chiar pe întinderea ei ; în acest caz, pe ea nu mai există drepte, ci numai linii cît se poate de drepte, respectiv cercurile mari ale globului pămîntesc. Devine imediat limpede că acestea nu pot fi decît traiectoriile particulelor care se mișcă libere pe suprafața înghețată a mării. Putem deci extinde prima lege a lui Newton la mișcarea corpurilor pe suprafețe netede, spunînd că pe o suprafață netedă un corp, care nu este solicitat de forțe exterioare, se mișcă pe linia cea mai dreaptă posibilă, pe această suprafață. Am enunțat astfel o lege fizică locală. Deoarece însă cunoaștem și cealaltă proprietate de minim a liniei geodezice, putem exprima legea și sub formă integrală, spunînd că fiecare corp trece de la un punct la altul pe drumul cel mai scurt.

Se pare că nu există nici un temei pentru a ridica obiecții de orice fel împotriva legilor extreme de tip local, în schimb, față de legile de tip integral, gîndirea actuală resimte o anumită repulsie. Putem înțelege faptul că o particulă dată alege la fiecare moment dat calea cea mai dreaptă, dar nu putem înțelege cum de poate compara între ele, cît ai clipi din ochi, toate legăturile posibile cu un punct îndepărtat și apoi să o aleagă pe cea mai scurtă. Aceasta sună mult prea metafizic.

Înainte însă de a urmări mai departe această ordine de idei, vrem să ne convingem cu privire la faptul că asemenea proprietăți de minim apar în toate domeniile fizicii și că ele reprezintă nu numai o formulare corectă a unor legi fizice, ci totodată una eficace și instructivă.

Un domeniu în care un principiu de minim s-a dovedit fără îndoială extrem de folositor este *statica*, știința despre *echilibrul* sistemelor mecanice de toate felurile, solitate de forțe arbitrare. Un corp care se mișcă pe o suprafață netedă sub acțiunea forței de gravitație ajunge în

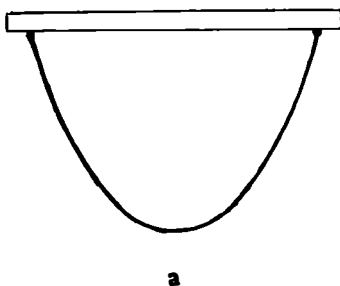


Fig. 9 a — Lănțișor

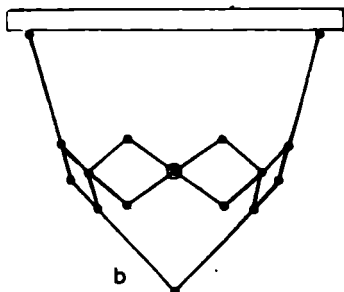


Fig. 9 b — Lanț din patru elemente cu un sistem de pîrghii care face vizibil centrul de greutate.

repaus, în stare de echilibru stabil, la punctul cel mai de jos, așa cum arată acest *pendul* (fig. 9 a). Dacă avem un sistem mecanic compus din diferite corpuri, atunci centrul de greutate al întregului sistem va tinde să se situeze cît mai jos posibil. Deci pentru a găsi echilibrul stabil, trebuie căutată situația în care înălțimea centrului de greutate este un minim. Produsul acestei înălțimi, cu forța de gravitație, se numește energie potențială.

Un lanț atîrnat de capete ia forma determinată de condiția ca înălțimea centrului său de greutate să fie un minim. În cazul că lanțul este format din foarte multe verigi, obținem așa-numitul *lănțișor*. Avem de-a face aici cu o autentică problemă variațională de tip izoperimetric, căci din infinitatea curbelor de aceeași lungime, între două extremități date lăntișorul are centrul de greutate cel mai coborît. Figura 9 b arată un lăntișor format numai din patru verigi. Centrul său de greutate poate fi găsit cu ajutorul unei construcții de vergele din material foarte ușor, care el însuși nu contribuie totuși în mod perceptibil la greutatea întregului. Dacă echilibrul lanțului este deranjat, atunci se observă că centrul de greutate se ridică de fiecare dată mai sus.

Vreau acum să vă dau un alt exemplu, în cazul căruia atracția universală acționează împotriva unei alte forțe, și anume împotriva elasticității. N-am ales acest exemplu din cauză că cu peste 30 de ani în urmă a fost tema dizertației mele de doctorat, ci pentru că, după cum vom vedea,

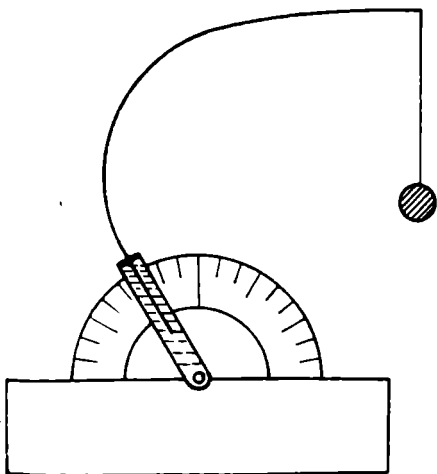


Fig. 10 — Platbandă de oțel cu o greutate suspendată (Elastică)

el ilustrează deosebit de bine deosebirea dintre principiile de minim proprii staticii și principiile variaționale formale ale dinamicii. O platbandă de oțel este înșurubată la un capăt și poartă o greutate la celălalt. Forța de gravitație trage această greutate în jos, în timp ce resortul, datorită elasticității sale, opune rezistență la încovoiere. Forței de elasticitate îi corespunde de asemenea o energie potențială. Trebuie efectuat un lucru mecanic bine determinat pentru a încovoia resortul într-o formă de o curbură dată, și este clar că această energie depinde într-un mod determinat de curbura platbandei de oțel, care variază de la punct la punct. Avem o stare de echilibru bine determinată, în care energia totală, adică energia depinzând de forța gravitațională, plus energia depinzând de elasticitate, este minimă. Dacă trag greutatea în jos, atunci energia

gravitațională descrește, dar într-o măsură mai neînsemnată decît crește energia elastică de încovoiere, așa încît, rezultă o forță care trage resortul înapoi, în poziția sa dinainte. Și invers, dacă ridic greutatea, creșterea energiei gravitaționale este mai mare decît descreșterea energiei de încovoiere, așa că rezultă iarăși o forță îndreptată spre poziția de echilibru. Veți vedea mai departe că pentru anumite unghiuri, sub care e fixat resortul, există două poziții de echilibru, una pe partea stîngă și una pe partea dreaptă. Acest lucru e valabil și pentru direcția verticală, în cazul căreia cele două poziții de echilibru sînt simetrice, dar numai dacă resortul e destul de lung. În cazul că fac destul de scurt resortul, atunci singura poziție posibilă de echilibru este aceea în care resortul stă drept. Pentru o greutate dată există, în acest caz, o lungime determinată, pentru care poziția verticală devine instabilă : aceasta este determinată prin condiția că atunci cînd energia potențială încetează să mai fie minimă pentru forma dreaptă, devine minimă pentru cea încovoiată.

Formula pentru această lungime caracteristică a fost găsită de Euler și joacă un rol important în tehnică, la determinarea rezistenței stîlpilor și coloanelor verticale. Asemenea instabilități apar însă și la fixări oblice. Dacă la o anumită lungime a bandei variem unghiul de fixare, atunci resortul va trece dintr-odată dintr-o poziție în cea opusă. Instabilitatea va fi determinată și aici prin condiția de minim pentru energie. Putem să prezentăm grafic apariția acestor limite de stabilitate printr-o diagramă dar nu vrem să marcăm înseși curbele elastice (de altfel, curbe deosebit de frumoase, ca „elastica“ prezentată în fig. 11), ci vrem să exprimăm unghiul de înclinare ca funcție de distanța de la capătul liber al resortului. Obținem atunci curbe în forme de unde (fig. 12), care pornesc toate orizontal, de la linia care corespunde capătului încărcat cu greutate al resortului. Se vede că aceste curbe au o înfășurătoare, și din calcul reiese că această înfășurătoare reprezintă limita de stabilitate. De la fiecare punct situat la dreapta înfășurătoarei pornesc cel puțin două curbe. Aceasta este în conformitate cu faptul că fiecare asemenea punct corespunde unui unghi de fixare, pentru care sînt posibile cel puțin două poziții de echilibru.

Dacă vom urmări în grafic o direcție verticală de jos în sus, atunci, în cazul lungimii constante a resortului, se modifică unghiul de fixare, iar dacă depășim înfășurătoarea, atunci ajungem într-un domeniu în care prin fiecare punct trece numai o curbă. Trecând prin înfășură-

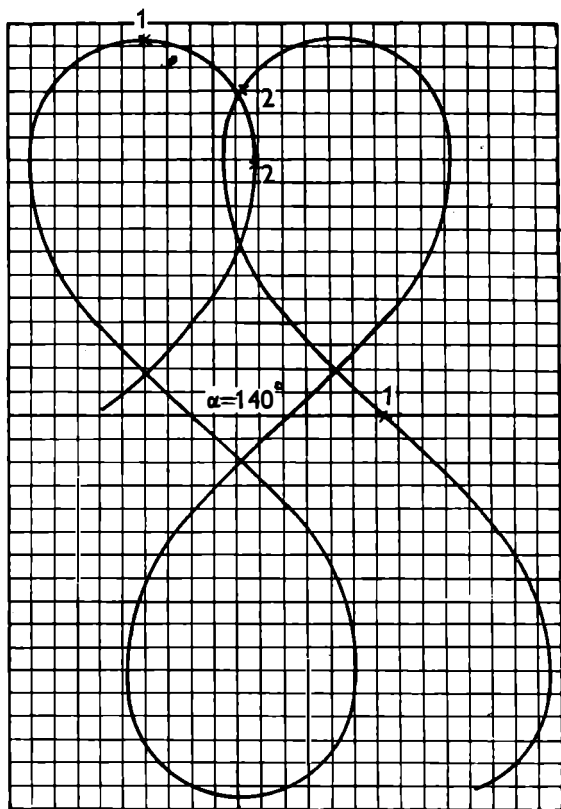


Fig. 11 — Elastică

toare, una dintre pozițiile de echilibru devine instabilă și trece prin salt în cealaltă. Limita de stabilitate pentru direcția oblică a resortului, indicată de Euler, apare în înfășurătoare ca un vîrf ascuțit, a cărui distanță de punctul de pornire este egală cu a patra parte din lungimea de undă

a curbei învecinate, într-o concordanță perfectă cu formula lui Euler. Cititorul este rugat să rețină acest exemplu, deoarece vom reveni mai târziu la el, atunci cînd vom

$$r = 0$$

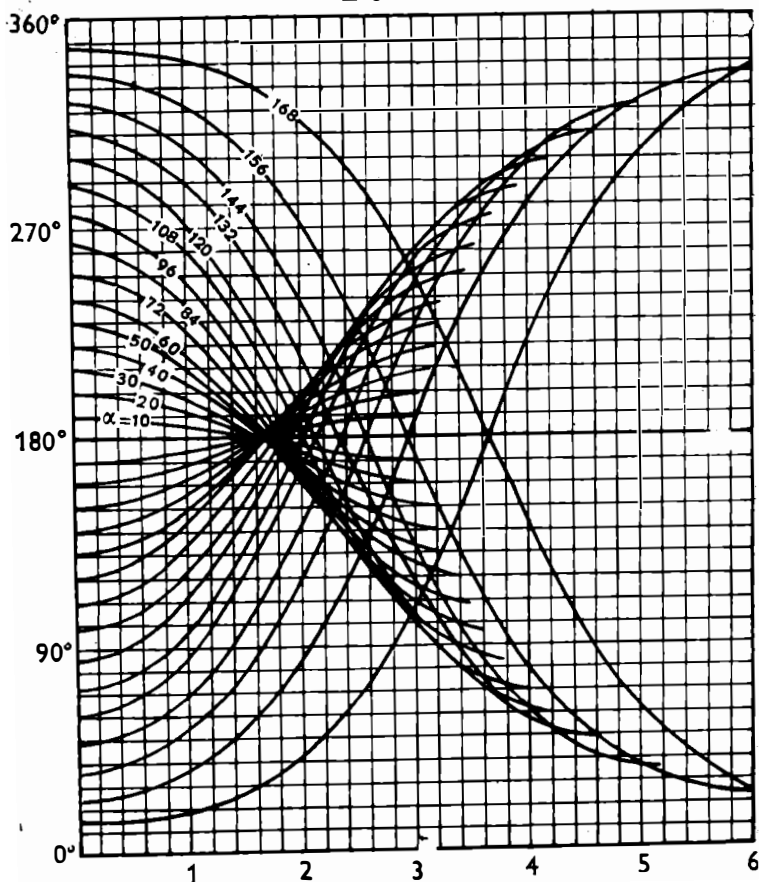


Fig. 12 — Limite de stabilitate pentru elastică

discuta despre principiile de minim ale dinamicii.

Un alt exemplu pentru ilustrarea principiului static al energiei minime sînt baloanele de săpun. Pojghițele sub-

țiri de săpun au proprietatea de a se contracta cît se poate de mult. Energia potențială este proporțională cu suprafața. Un experiment binecunoscut dovedește acest lucru. O buclă de sîrmă de formă circulară, în interiorul căreia e întins un fir de ață, este acoperită cu o peliculă de săpun. Dacă se distruge pelicula de săpun într-o parte a firului de ață, atunci ea se va contracta de partea cealaltă, firul de ață se va întinde tare, luînd forma unui arc de cerc. La un al doilea experiment se întrebuintează o buclă de ață. Dacă se va distruge pelicula de săpun în interiorul acesteia, atunci bucla va forma, din cauza contracției exercitată de partea exterioară a peliculei, un cerc exact ; de unde rezultă că pelicula de săpun se află sub o tensiune uniformă.

De aici reiese în mod clar că un balon de săpun închis, umplut cu aer, dacă plutește liber în spațiu, trebuie să aibă o formă sferică, respectiv, ia acea formă care la un volum dat se dovedește minimă. Cu aceasta am obținut analogul spațial al problemei Didonei.

Există și alte suprafețe minime neînchise, care sînt mărginite de o curbă închisă dată. Pentru a le găsi, n-avem decît să dăm sîrmei forma curbei de frontieră care limitează suprafața și apoi să o cufundăm într-o soluție de săpun ; obținem un model fizic al suprafeței minime corespunzătoare. Aceste experiențe, împreună cu explicația lor teoretică au fost întreprinse cu mult timp în urmă, de către fizicianul francez orb Plateau ; o relatare sugestivă cu privire la ele se găsește în vestita cărticică despre *Baloanele de săpun* a lui C. V. Boys. Aceste experimente arată în mod convingător cît de bun matematician e natura și cît de repede găsește ea rezolvarea problemelor sale.

Sînt unii care pot fi dispuși să considere că aceste experimente sînt jucării nostime, fără vreo semnificație serioasă. Eu le-am amintit aici numai ca exemple deosebit de evidente pentru principiul energiei potențiale minime, importanța căruia cu greu poate fi exagerată. Toate construcțiile ingineresti se bazează pe acest principiu, precum și toate problemele de structură ale fizicii și ale chimiei.

Aș vrea să vă prezint aici, ca exemplu, cîteva modele de rețele cristaline. Un cristal constă dintr-o distribuție spațială regulată a unor atomi de un anumit tip. Desco-

perirea de către Von Laue, Friedrich și Knipping a difracției radiațiilor röntgen în aceste rețele atomice a fost folosită de către Sir William Bragg și de către fiul său, Sir Lawrence Bragg, pentru a determina în mod empiric așezarea atomilor în rețelele cristaline. În prezent, un mare număr de asemenea rețele cristaline sînt bine studiate. Ca exemplu, am aici două modele simple, fiecare constînd din două feluri de atomi dispuși în mod egal pe unitatea de rețea, dar avînd structuri diferite. Primul este un cristal de sare de bucătărie, clorură de sodiu (Na Cl), iar celălalt este o sare asemănătoare, și anume clorură de cesiu (Cs Cl). Se pune aici întrebarea: de ce diferă rețelele? Răspunsul poate fi dat numai pe baza unei examinări mai profunde a forțelor care acționează între atomi, căci este clar că structura rețelei este determinată prin condiția energiei potențiale minime. Și invers, cercetarea acestei condiții de echilibru ne va da indicații cu privire la proprietățile forțelor atomice. Eu însumi am consacrat o lucrare cercetării acestui domeniu. S-a putut arăta că în toate aceste cristale de sare partea esențială a interacțiunii provine de la forțele electrostatice care acționează între atomii încărcăți („ionii“), dar că deosebirea de stabilitate dintre cele două feluri de rețele se bazează pe o altă forță, mai slabă, și anume, pe coeziunea universală, care e cauza faptului că gazele se condensează la o temperatură mai joasă. Această forță, așa-numita atracție a lui *Van de Waal*, este mai mare pentru atomii mai mari; deoarece atomii de cesiu sînt mult mai mari decît cei de natriu, minimul energiei potențiale va fi obținut printr-o altă așezare a rețelei în sarea de cesiu decît în sarea de natriu.

Reflecțiile de acest fel, care sînt mai mult sau mai puțin cantitative, ne ajută să înțelegem o mulțime de fapte privind structura interioară a materiei solide.

Ca metode de tip asemănător poate fi cercetat și echilibrul atomilor în molecule, dar nu vreau să discut aici această problemă, căci problema structurii moleculare nu este o problemă statică, ci una dinamică, deoarece cuprinde și mișcarea electronilor în atom.

Totuși, înainte de a trece la examinarea principiilor de minim ale dinamicii, care nu sînt atît de limpezi și de

satisfăcătoare ca cele ale staticii, să examinăm mai întâi o altă parte a fizicii, care constituie un domeniu oarecum intermediar între statică și dinamică. Este vorba despre teoria căldurii, *termodinamica* și *mecanica statistică*. Fenomenele despre care e vorba aici sînt de felul următor : sînt puse în contact sau amestecate substanțe de compoziții și temperaturi diferite și se cercetează sistemul total care rezultă. De aceea, aici avem de-a face cu trecerea de la o stare de echilibru la alta ; dar nu ne interesează atît de mult însăși această trecere, cît starea finală rezultată. Am aici, de pildă, un pahar cu apă și o sticlă cu colorant natural ; torn puțină culoare roșie în apă și obținem un amestec roz. Se obține deci trecerea de la o stare de echilibru (apă curată + substanță colorantă) la alta (soluție colorată). Ne aducem aminte de comportarea unei platbande de oțel încărcată cu o greutate, unde existau, de asemenea, în anumite condiții, două stări de echilibru, una la dreapta și una la stînga. Și totuși, situația de fapt este în cele două cazuri cu totul deosebită. În cazul platbandei de oțel, se poate obține, printr-un impuls (alimentarea cu energie), ca o stare de echilibru să treacă prin salt în cealaltă. Atunci sistemul poate să revină, fără dificultăți, prin salt, în starea inițială. Procesul este reversibil și duce la o stare de echilibru definitivă, numai dacă surplusul de energie e iar îndepărtat. În cazul amestecului a două lichide, o stare de echilibru definitivă poate fi însă obținută în mod automat, iar procesul e *ireversibil*. Amestecul nu va mai reveni niciodată spontan în starea pură și nici separarea artificială a celor două lichide nu poate fi realizată în nici un caz cu mijloace simple.

Pentru procesele ireversibile există un principiu extrem de foarte important, pe care l-a descoperit lordul Kelvin : o anumită mărime, așa-numita entropie, crește în cazul unui asemenea proces și ajunge la maximum o dată cu starea definitivă de echilibru. Nu este de loc simplu să descrii această mărime misterioasă, pe care o numim entropie, cu ajutorul unor mărimi care pot fi observate în mod direct, cum sînt volumul, temperatura și căldura. Din punctul de vedere al teoriei atomice, importanța sa devine imediat evidentă. Ce se întîmplă de fapt atunci cînd soluția roșie se împrăștie în apa curată ? Moleculele sub-

stanței colorante, de culoare roșie, care la început erau concentrate la un volum limitat, se extind acum asupra unui volum mai mare și în acest fel o stare cu un grad mai înalt de ordonare trece într-o stare mai puțin ordonată. Vreau să explic acest lucru cu ajutorul unui model. Într-o cutie întinsă deschisă (o mică masă de biliard) pun bile (cumpărate de la Woolworth pentru câțiva pfenigi). Dacă le voi pune, mai întâi, pe toate cu grijă în jumătatea din dreapta a cutiei, care e așezată orizontal, atunci obținem o stare parțial ordonată. Dacă scutur acum cutia, atunci bilele se întind pe tot fundul cutiei și trec într-o configurație cu o ordonare mai redusă. Dacă arunc toate cele 20 de bile în mod arbitrar în cutie, atunci e foarte improbabil ca toate să ajungă tocmai în jumătatea din dreapta. Mărimea probabilității ca toate bilele să fie împărțite în mod egal pe fundul neted al cutiei, în comparație cu probabilitatea ca majoritatea bilelor să cadă în jumătatea din dreapta, poate fi calculată cu ușurință și se va găsi o probabilitate cu mult mai mare pentru distribuția uniformă. Teoria statistică a căldurii definește în prezent entropia unui sistem pe baza probabilității de distribuție a atomilor și explică astfel că entropia crește mereu și tinde spre un maxim.

Un dispozitiv care face inteligibil, prin exemplificare concretă, modul cum acționează probabilitatea, este planșeta lui Galton (engl.: *Quincunx*), un fel de *Tivolispiel* simplificat. Printr-un orificiu prevăzut la mijlocul părții de sus a planșetei sînt lăsate să cadă liber mai multe bile sferice. În cădere ele se ciocnesc de numeroase obstacole de forma unor triunghiuri mici, astfel că la fiecare ciocnire există aceeași probabilitate ca bila să alunece fie la dreapta, fie la stînga, și este extrem de improbabil ca fiecare bilă să fie deviată mereu în aceeași direcție. Din această cauză, recipientele mici, pentru primirea alicelor, fiinduite în părțile laterale ale planșetei, vor rămîne relativ goale atît pe o parte, cît și pe alta; spre mijloc însă recipientele se vor umple. Celula din mijloc se potrivește bilelor care sînt deviate, la fel de des, spre dreapta sau spre stînga, corespunde adică unei repartiții uniforme a levierilor și rezultă că aici se află un maxim clar. Cu aceasta e demonstrată în mod plastic probabilitatea foarte

mare a unei distribuții uniforme atît a bilelor din model, cît și a moleculelor substanței colorante, de culoare roșie, din experiența de fizică.

Legea termodinamică a maximului entropiei este astfel, într-adevăr, o lege statistică și are în fond puțin de-a

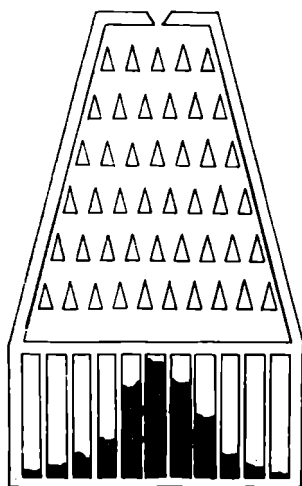


Fig. 13—Planșeta lui Galton

face cu dinamica. Dacă un sistem se află la început într-o stare de ordonare parțială, adică într-o stare care nu este cea mai probabilă (ceea ce corespunde celei de la mijloc a planșetei lui *Galton*), atunci este foarte probabil ca peste un anumit timp aceasta să se fi apropiat de starea probabilității maxime, respectiv de entropia maximă. Foarte probabil, dar nu absolut sigur! Și într-adevăr, metodele moderne de cercetare microscopică au prezentat cazuri în care pot fi constatate abateri de la starea cea mai probabilă. Principiul extremal al mecanicii statistice este, în consecință, de alt tip decît legile corespunzătoare ale mecanicii pure. Nu mă pot opri totuși, în acest cadru, mai îndeaproape asupra chestiunii dificile cu privire la rolul pe care-l joacă întîmplarea și probabilitatea în fizică.

Permiteți-mi să mă întorc, după această digresiune, la *principiile de minim ale dinamicii*. Una dintre primele probleme de acest fel — „înainte de toate“, atât în ce privește cronologia cât și în raport cu simplitatea sa — a fost formulată spre sfârșitul secolului al XVII-lea, și

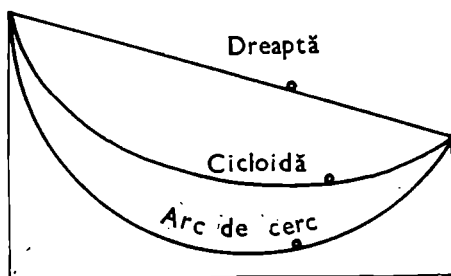


Fig. 14 — Brahistocrona

anume de către Johann Bernoulli, din Basel, un membru al marii familii Bernoulli, care a dat mulți savanți vestiți, printre care, deosebit de mulți matematicieni. Este vorba despre problema curbei celui mai scurt timp de cădere pe o pantă, *brahistocrona* (grec, *brahistos* = cel mai scurt, și *cronos* = timp), adică de a găsi pentru două puncte date, care nu se găsesc pe aceeași verticală, linia de legătură, de-a lungul căreia un corp ce se mișcă sub acțiunea gravitației, fără frecare, ajunge în cel mai scurt timp din punctul care se află mai sus în punctul de mai jos, bineînțeles că în comparație cu toate celelalte legături posibile între cele două puncte. Un model, schițat în fig. 14, vă va da o idee concretă despre această problemă; numai că aici, în locul unei infinități de linii de legătură, sînt trase doar trei curbe, o dreaptă, un arc de cerc și o curbă care se află între ele. Corpul care alunecă fără frecare este reprezentat în mod aproximativ printr-o bilă de oțel pentru rulmenți, care se deplasează între două șine. Această așezare are avantajul nu numai de a reduce cu mult frecarea, ci de a întîrzia de asemenea întreaga mișcare, care s-ar petrece prea repede fără această măsură de precauție. Deoarece distanța dintre șine este egală cu o fracțiune din diametrul bilei, bila înaintează la fiecare rotație com-

pletă numai cu o fracțiune a drumului pe care l-ar fi parcurs în cazul rostogolirii pe o suprafață netedă. Prin acest artificiu se obține la o forță gravitațională constantă o multiplicare a inerției. Legile mișcării rămân neschimbate, numai unitatea de timp e redusă.

Înainte de a organiza o întrecere între cele trei bile, puteți încheia rămășaguri în ce privește câștigătorul, și eu sînt gata să fac oficiul de arbitru. Bineînțeles că nu este meritul bilei respective dacă ajunge prima la sosire, ci depinde numai de structura traiectoriei pe care o are de parcurs. Eu dau drumul bilelor, și veți vedea că nu drumul drept îl va duce pe învingător la sosire, nici panta abruptă a arcului de cerc, ci curba care se află între ele. Oricare alte curbe am lua, rezultatul ar fi același; căci traiectoria învingătorului a fost constituită în conformitate cu calculele teoretice: este așa-numita *cicloidă*, o curbă pe care o puteți observa pe stradă, de sute de ori în fiecare zi. Este curba pe care o descrie un punct oarecare pe obada unei roți care se învîrtește pe un drum drept. Dacă voi lăsa această șaibă rotundă, pe marginea căreia am fixat o cretă, să se rostogolească pe tablă, atunci creta va desena pe tablă tocmai această curbă.

Demonstrarea faptului că cicloida este o brahistocronă a fost la timpul său o mare realizare matematică. Căci este vorba, în acest caz, despre o veritabilă problemă variațională, și rezolvarea sa a fost mult admirată și imitată. Fiecare matematician al timpului și-a încercat aptitudinile analitice încercînd să rezolve probleme *de extremum* asemănătoare. Daniel Bernoulli, un alt membru al vestitei familii, a dezvoltat la începutul secolului al XVIII-lea principiul de minim al staticii, despre care am vorbit mai înainte, și l-a aplicat la lăntșor și la elastică. Încurajat de aceste succese, Daniel Bernoulli a pus întrebarea dacă e posibil să se determine traiectoria și modalitatea mișcării unui corp sub influența unor anumite forțe — de pildă, traiectoria unei planete — printr-o proprietate de minim a mișcării sale reale, în comparație cu toate celelalte traiectorii posibile. El a prezentat această întrebare celui mai mare matematician al timpului său, lui Leonard Euler, care a manifestat un mare interes pentru problemă și a consacrat mai mulți ani rezolvării ei. În

toamna anului 1743 el a găsit o soluție, pe care, cu ajutorul mai multor exemple, a descris-o în anexa la o carte despre problemele isoperimetrice, apărută în anul 1744. Aceasta este rădăcina istorică a *principiului acțiunii minime*, care a jucat, pînă în prezent, un rol predominant în fizică. Istoria acestui principiu este o uimitoare încurcătură de controverse, dispute asupra priorității, și multe alte asemenea neplăceri. În același an 1744, Maupertuis a prezentat Academiei din Paris o lucrare, în care el a înlocuit principiul optic al lui Fermat, al celei mai scurte traiectorii a luminii, despre care am mai vorbit, printr-o ipoteză destul de arbitrară, pe care a extins-o mai tîrziu, în anul 1746, asupra tuturor modurilor de mișcare. După procedeul lui Leibniz, el a definit acțiunea ca suma produselor dintre masă, viteză și distanță, și a stabilit principiul general, conform căruia, pentru fiecare mișcare actuală această mărime trebuie să fie minimă. Dar n-a reușit niciodată să dea o demonstrație satisfăcătoare pentru principiul său (ceea ce nu este de mirare, deoarece este inexact), ci l-a susținut cu argumente metafizice despre economia în natură. El a fost atacat violent de către cavalerul d'Arcy din Paris, Samuel König din Berna și alții, care demonstrează că dacă principiul lui Maupertuis ar fi adevărat, atunci natura econoamă ar fi nevoită, în anumite condiții, să cheltuiască nu un minim, ci un maxim de acțiune. Euler, care a interpretat principiul într-un mod deplin corect, a avut o comportare stranie. Nu numai că n-a pretins pentru sine prioritatea descoperirii, ci și-a exprimat chiar admirația față de principiul lui Maupertuis, despre care a afirmat că este cel mai general. Este greu de găsit o explicație pentru atitudinea sa. Se pare că publicarea parțială a unei scrisori adresată de König lui Leibniz, în care principiul a fost amintit, l-a determinat pe Euler să ia poziție în favoarea lui Maupertuis. Autenticitatea acestei scrisori n-a putut fi verificată niciodată; probabil că a fost vorba despre un fals, menit să zdruncine situația lui Maupertuis, care era atunci președintele Academiei din Berlin și se bucura de trecere pe lângă regele Friedrich al II-lea. Acum discuția s-a extins pe culoarele curții regale de la Sanssouci și chiar în sferele politicii. Voltaire, prietenul lui Friedrich, nu-l putea suferi pe trufașul președinte al

Academiei și a luat partea celui mai slab, a domnului König din Berna. El a scris un pamflet mușcător împotriva lui Maupertuis, sub titlul : *Dr. Akakia*. Friedrich, cu toate că a găsit că satira spirituală a lui Voltaire este cât se poate de amuzantă, nu-l putea lăsa totuși în încurcătură pe eminentul său președinte al Academiei, și a fost nevoit să-i ia apărarea lui Maupertuis. Acest lucru a dus pînă la urmă la ruptura dintre regele Friedrich și Voltaire, care a trebuit să părăsească Berlinul, așa cum o povestesc biografiile lui Friedrich cel Mare și a lui Voltaire.

Blestemul acestei confuzii a tras mult în balanță în defavoarea principiului minimei acțiuni. Lagrange, care a perfecționat dinamica lui Newton, dă de asemenea o formulare nesatisfăcătoare principiului. Matematicianul Jakobi a introdus o condiție restrictivă, care a dat condiției de minim o orientare corectă. Aceasta a însemnat un mare pas înainte. Dar blestemul a fost dezlegat definitiv de-abia de către marele irlandez, William Rowan Hamilton, care a dat principiului o formă matematică ireproșabilă, simplă și generală. Cu aceasta, a fost dată totodată o lovitură de moarte interpretării după care principiul ar fi expresia unei economii deosebite în natură. Vreau să lămuresc acum pe scurt cum stau lucrurile în realitate.

Am examinat de-acum mărimea care se numește *energie potențială* a unui sistem de forțe și am văzut că este egală cu lucrul mecanic, care trebuie să fie produs pentru a aduce sistemul într-o stare dată, reprezentînd deci măsura aptitudinii sistemului de a produce lucru mecanic. Energia potențială depinde numai de poziție și își are minimul în starea de echilibru. Dacă sistemul se află în mișcare, atunci o parte a energiei sale potențiale se transformă în energie de mișcare sau *energie cinetică*, egală cu jumătatea masei, înmulțită cu pătratul vitezei, însumată. Legea conservării energiei spune că suma celor două forme de energie este constantă. În schimb, principiul lui Hamilton tratează nu despre suma celor două forme de energie, ci despre diferența lor. Și anume, el spune că fiecare mișcare are loc astfel, încît o mărime, pe care noi o numim acțiune, și care e egală cu suma contribuțiilor fiecărui interval de timp la diferența energiei cinetice și

a celei potențiale, este staționară pentru mișcarea reală în comparație cu toate celelalte mișcări posibile în același timp, de la aceeași configurație inițială, la configurația finală.

Eu folosesc aici în mod intenționat expresia staționar și nu minim, deoarece, în general, nu e vorba despre nici un minim.

Ceea ce se întâmplă în realitate poate fi foarte ușor clarificat cu ajutorul *pendulului simplu*, pentru că, printr-o fericită întâmplare matematică, există o problemă statică, pentru care, în cazul pendulului, principiul propriu-zis de minim al energiei potențiale coincide cu principiul minimei acțiuni. Iată-o din nou pe vechea noastră cunoștință, platbanda de oțel încărcată. De fapt, energia totală de încovoiere, completată cu energia gravitațională a greutateii fixate la capătul său, are exact aceeași expresie matematică ca și acțiunea totală a pendulului, adică cu suma contribuțiilor tuturor elementelor de timp la diferența dintre energia cinetică și cea potențială. De aceea curbele, care reprezintă unghiul de înclinare a curbei de încovoiere ca funcție de distanța la extremitatea liberă, sînt exact aceleași cu cele care reprezintă unghiul de deviere a pendulului ca funcție de timp. Se vede că curbele desenate în fig. 12 au într-adevăr același caracter ondulatoriu, ca și acelea care reprezintă devierea pendulului ca funcție de timp (chiar dacă este înscrisă numai o mică parte a curbelor).

Am văzut acum că numai acele părți ale diagramei care sînt acoperite de curbe corespund unui minim real, adică unei configurații stabile a elasticii. Dar în domeniul închis de înfășurătoare, prin fiecare punct dat trece mai mult decît o singură curbă. Numai una dintre aceste curbe corespunde unui minim real, însă fiecare dintre ele reprezintă o mișcare posibilă a pendulului. Deși condițiile de la extremitățile platbandei elastice nu corespund exact cu condițiile inițiale și finale din principiul lui Hamilton, totuși ele au o caracteristică comună. Dacă lungimea resortului, respectiv intervalul corespunzător de timp din principiul lui Hamilton pentru pendul, depășește o anumită limită, soluția nu mai este univocă și, deși fiecare soluție este o mișcare posibilă, nu fiecare are un minim real. De

aici, trebuie să conchidem că mișcarea nu se caracterizează în toate cazurile printr-o proprietate efectivă de *extremum* al acțiunii, dar că întotdeauna mărimea acțiunii este staționară, după cum am afirmat mai sus.

Vedem deci că interpretarea legii mișcării ca o expresie a economiei naturii se prăbușește. Chiar dacă natura ar urmări un scop, care și-ar găsi expresia în principiul minimeii acțiuni, în orice caz, acesta nu poate fi asemuit scopurilor și țelurilor unui om de afaceri. Ideea de a descoperi în funcționarea legilor naturii un scop sau o tendință spre economie este o absurditate antropomorfă, o rămășiță din vremurile în care științele naturii erau dominate de speculația metafizică. Chiar dacă am accepta ideea că natura procedează atât de zgîrcit cu rezervele sale de acțiune, încît încearcă să economisească din ele pe cît posibil mai mult (de altfel, după cum am văzut, ea a avut succes în această tentativă doar în etapa inițială a mișcării), și încă n-am înceta să ne mirăm de ce acordă ea o considerație atât de înaltă tocmai acestei mărimi ciudate.

Adevărata însemnătate a principiului lui Hamilton se află în cu totul altă direcție.

Nu natura face economie, ci știința naturii. Orice cunoaștere a naturii începe cu acumularea de fapte și progresează apoi, sintetizînd numeroasele fapte în legi simple, iar acestea, la rîndul lor, în legi mai generale. În fizică, acest proces apare cu claritate deosebită. Să ne gîndim, de pildă, la teoria electromagnetică a luminii, elaborată de Maxwell, prin care optica a devenit o ramură a electrodinamicii generale. Principiile de minim constituie un mijloc extrem de eficace pentru o asemenea unificare. E foarte ușor să înțelegem acest lucru, dacă mai luăm o dată în considerare exemplul nostru cel mai simplu cu privire la legătura cea mai scurtă. Dacă unui comandant militar îi stă la dispoziție o hartă bună, atunci el poate permite trupelor sale să se miște de la o poziție la alta, indicîndu-le pur și simplu țelul respectiv, fără a se interesa de amănuntele itinerarului, deoarece el poate considera că conducătorul trupei o va duce de fiecare dată spre obiectiv pe drumul cel mai scurt. Ținînd seama de hartă, principiul de minim reglementează toate mișcările trupei. La fel principiile de minim ale fizicii înlocuiesc un mare număr de

legi și reguli, presupunînd de fiecare dată că harta, adică în cazul nostru energia cinetică și cea potențială, e dată.

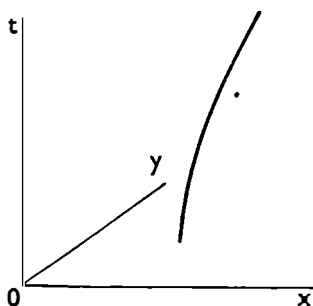
Ar fi ideal să poți strînge laolaltă toate legile fizicii într-una singură, să găsești o *formulă universală*, a cărei existență a fost postulată cu peste un secol înainte de către astronomul francez Laplace.

Filozoful vienez Ernest Mach a afirmat că economia de gîndire ar fi singura justificare a științelor naturii. Eu nu pot să împărtășesc acest punct de vedere. Eu cred, dimpotrivă, că există multe alte puncte de vedere și justificări în favoarea științelor naturii, deși nu neg că economia de gîndire și de cuprindere a rezultatelor în puncte de vedere unificatoare sînt țeluri deosebit de importante. De altfel, consider că stabilirea formulei universale a lui Laplace este un ideal într-adevăr îndreptățit. Nu încape îndoială că principiul lui Hamilton înseamnă un pas în această direcție. Ar putea să fie chiar formula universală, dacă ar fi cunoscută expresia corectă a energiei potențiale pentru toate forțele. Gînditorii din secolul al XIX-lea urmăreau într-un mod mai mult sau mai puțin explicit acest scop și au obținut succese uimitoare în această direcție.

Datorită alegerii expresiei adecvate pentru energia potențială, pot fi descrise aproape toate fenomenele, cuprinzînd nu numai dinamica corpurilor solide și a celor elastice, a lichidelor și a gazelor, ci și electricitatea și magnetismul, teoria electronilor și optica. Punctul culminant al acestei dezvoltări a fost atins cu teoria relativității a lui Einstein, datorită căreia principiul abstract al acțiunii minime a obținut iarăși o interpretare geometrică simplă, cel puțin în ce privește energia cinetică. În acest scop, timpul trebuie conceput ca cea de-a patra coordonată (a se vedea fig. 15, în care este omisă una dintre coordonatele spațiale). Orice mișcare este reprezentată printr-o linie, în lumea cvadridimensională x, y, z, t , în care e valabilă geometria neeuclidiană a lui Riemann. Un segment al acestei linii corespunde exact cu partea cinetică a acțiunii din principiul lui Hamilton, iar curbele care reprezintă mișcarea sub influența forței gravitaționale sînt liniile geodezice ale spațiului cu patru dimensiuni. Legea de gravitație a lui Einstein, care cuprinde legea lui Newton ca pe un caz-limită, poate fi de asemenea dedusă dintr-un principiu *de*

extremum, în care mărimea, care trebuie să aibă proprietatea *de extremum*, poate fi interpretată ca fiind curbura totală a lumii spațio-temporale. Dar acestea sînt reflexii abstracte, asupra cărora nu pot insista aici.

Perioada din istoria fizicii, care și-a găsit încheierea



Fig, 15

o dată cu teoria relativității, o numim clasică, în opoziție cu fizica modernă, care e dominată de *teoria cuantelor*.

Cercetarea atomilor, a combinărilor lor din nuclee și electroni, și a structurii nucleelor înseși ne-au condus la convingerea că legile fizicii clasice nu mai sînt valabile pentru acest microcosmos. A fost dezvoltată o mecanică nouă, care explică satisfăcător faptele observate, dar care este cu totul diferită de reprezentările și metodele clasice. Ea rupe cu punctul de vedere strict determinist în favoarea unuia statistic. Să examinăm, de pildă, descompunerea spontană a unui atom de radiu. Nu putem prezice cînd va începe, dar putem stabili o lege exactă pentru probabilitatea descompunerii sale într-un anumit interval de timp, și astfel să prezicem comportarea medie a unui mare număr de atomi de radiu. Mecanica nouă consideră că toate legile fizice sînt de natură statistică. Mărimea fundamentală este o *funcție de undă*, care se supune unor legi asemănătoare cu legile din acustică sau optică. Dar ea nu este o mărime direct observabilă, ci determină indirect probabilitatea unor procese observabile. În concordanță cu cele de mai sus, aici ne interesează înainte de toate faptul, că chiar această funcție abstractă de undă din mecanica cuan-

tică satisface un principiu *de extremum* de tip *hamiltonian*.

Cu toate acestea, sîntem încă foarte departe de cunoaşterea formulei universale a lui Laplace, dar avem dreptul să presupunem că dacă o vom găsi, ea va lua forma unui principiu *de extremum* nu pentru că natura însăşi ar avea o voinţă deosebită, sau ar urmări vreun scop, sau ar fi deosebit de econoamă, ci pentru că mecanismul gîndirii noastre nu cunoaşte nici o altă cale pentru a conferi complicatei structuri a legilor naturii o expresie scurtă, precisă.

A N E X Ă

Deoarece această argumentare, îndreptată împotriva interpretării principiului acţiunii minime în spiritul economiei naturii înseşi, se întemeiază în mod esenţial pe comparaţia problemei dinamice a pendulului cu problema statică a unui resort elastic încărcat cu o greutate, poate că cititorii, care dispun de unele cunoştinţe matematice, vor saluta deducerea unor formule, care dovedesc identitatea principiilor variaţionale în ambele exemple.

Fie l lungimea pendulului, θ deviaţia sa. Atunci $d\theta/dt$ este viteza unghiulară şi $ld\theta/dt$ viteza liniară (a se vedea fig. 16) ; prin urmare, energia cîntetică $T = \frac{1}{2} ml^2(d\theta/dt)^2$,

unde m este masa pendulului. Înălţimea greutăţii faţă de poziţia cea mai de jos (a se vedea fig. 16 a) este $l - l\cos\theta$. Dacă această expresie este înmulţită cu mg (unde g este acceleraţia gravitaţională), atunci se obţine energia potenţială. Constanta aditivă mgl poate fi omisă, şi atunci, pentru energia potenţială se obţine expresia $U = -mgl\cos\theta$. Diferenţa dintre energia cîntetică şi cea potenţială este

$T - U = \frac{1}{2} ml^2(d\theta/dt)^2 + mgl\cos\theta$, iar mărimea acţiunii în intervalul de la $t = 0$ pînă la $t = \tau$ este egală cu

$$\int_0^\tau \left\{ \frac{1}{2} A (d\theta/dt)^2 + W \cos \theta \right\} dt,$$

unde A reprezintă expresia ml^2 şi W expresia mgl .

Să considerăm acum o platbandă de oţel elastică. Energia acumulată în elementul ds al resortului, datorită încovoierii acestuia într-o curbă cu raza de curbura ρ , este

egală cu $\frac{1}{2} A ds/\rho^2$, dacă A este modulul de încovoiere. Figura 16 b arată că $ds = \rho d\theta$, astfel încît energia de încovoiere a lui ds este egală cu $\frac{1}{2} A (d\theta/ds)^2 ds$, și deci energia elastică totală a încovoierii este egală cu

$$\int_0^l \frac{1}{2} A (d\theta/ds)^2 ds,$$

unde l este acum lungimea resortului.

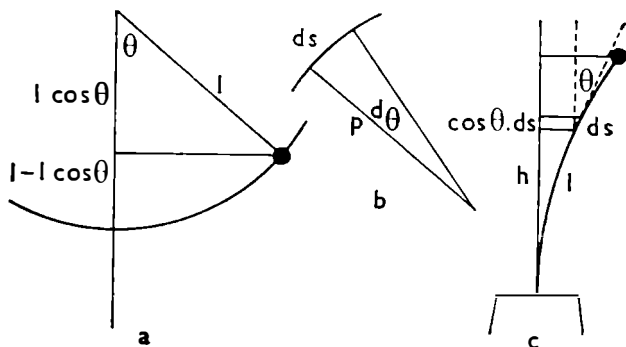


Fig. 16

Mai departe, energia potențială a greutății W fixate la capătul resortului, este egală cu Wh , dacă h este înălțimea greutății deasupra nivelului capătului fixat al resortului. După cum rezultă, evident, din fig. 16 c, această înălțime h este suma contribuției $\cos\theta ds$ a elementului de lungime ds al platbandei de oțel. Prin urmare, energia potențială a greutății este egală cu

$$\int_0^l W \cos \theta ds,$$

și prin adunare obținem pentru întreaga energie potențială

$$\int_0^l \left\{ 1/2 A (d\theta/ds)^2 + W \cos \theta \right\} ds,$$

o expresie care este identică cu acțiunea pendulului, dacă elementul de lungime ds și lungimea totală l a bandei de oțel sînt înlocuite prin elementul de timp dt și timpul total τ

*Teoriile statistice
ale lui Einstein**

Am impresia că unul dintre volumele cele mai remarcabile din întreaga literatură științifică este volumul 17 (seria a 4-a), din anul 1905, al publicației „Annalen der Physik”. El cuprinde trei lucrări ale lui Einstein, în care acesta se ocupă de domenii diferite, dar care astăzi sînt recunoscute toate drept capodopere, fiecare fiind un punct de pornire pentru cîte o nouă ramură a fizicii. Aceste trei domenii, în ordinea în care apar în volum, sînt următoarele: teoria fotonilor, mișcarea moleculară browniană și relativitatea.

Relativității îi este consacrat ultimul dintre cele trei articole, ceea ce arată că mintea lui Einstein nu era pe atunci ocupată în întregime de ideile sale cu privire la spațiu și timp, simultaneitate și electrodinamică. După părerea mea, el ar fi fost unul dintre cei mai mari fizicieni teoreticieni ai tuturor timpurilor, chiar dacă n-ar fi scris nici un singur rînd cu privire la relativitate, ceea ce constituie o ipoteză, ce-i drept, destul de absurdă. Căci concepția lui Einstein despre lumea fizică nu poate fi compartimentată, și este cu totul imposibil să ne închipuim că el ar fi scăpat din vedere, pe o durată mai lungă, vreo problemă fundamentală a timpului nostru.

Aș vrea să mă ocup acum de contribuția lui Einstein la metodele statistice ale fizicii. Lucrările pe care le-a publicat cu privire la această temă pot fi împărțite în două

* Din vol., *Albert Einstein ca filozof și cercetător al naturii*, editat de P. A. Schilpp, editura W. Kohlhammer, II, 5, p. 84. Tradus din engleză, după *The Library of Living Philosophers*, vol. VII, II, 5, p. 161.

grupe : primele tratează despre mecanica statistică clasică, cele de mai târziu, despre teoria cuantică. Ambele grupe sînt în modul cel mai strîns legate cu filozofia științei a lui Einstein. El a recunoscut, mai clar decît oricine înaintea sa, fundamentul statistic al legilor fizicii, iar în lupta dusă pentru clasificarea domeniului încă confuz al fenomenelor cuantice a dus o muncă de pionierat. Mai târziu însă, atunci cînd prin opera sa se crease o sinteză a principiilor statistice și cuantice, care părea acceptabilă aproape pentru toți fizicienii, el s-a ținut deoparte și a luat o atitudine de respingere. Multora dintre noi, acest lucru ni s-a părut ceva tragic, atît pentru Einstein însuși, care e constrîns acum să-și urmeze drumul de unul singur, cît și pentru noi, cei care sîntem lipsiți astfel de maestrul și stegărul nostru. Nu îndrăznesc să propun o rezolvare a acestei sciziuni. Trebuie să ne împăcăm cu ideea că și în fizică convingerile principiale sînt mai tari decît argumentele raționale, așa cum de altfel e cazul și în toate celelalte domenii de activitate a omului. Misiunea mea este să dau o dare de seamă despre opera lui Einstein și să o discut din propriul meu punct de vedere filozofic.

Prima lucrare a lui Einstein, din anul 1902, *Teoria cinetică a echilibrului caloric și a celui de-al doilea principiu al termodinamicii* [1], este un exemplu remarcabil în ceea ce privește faptul că ideile importante, atunci cînd s-a copt timpul pentru ele, sînt dezvoltate aproape simultan de către diferiți oameni, în diferite locuri. În introducerea sa, Einstein spune că pînă atunci n-a dedus încă nimeni cu rezultate bune condițiile echilibrului caloric și ale celui de-al doilea principiu al termodinamicii, din considerente probabilistice, deși Maxwell și Boltzmann au fost aproape de acest lucru. Pe Willard Gibbs nu-l pomeneste. De fapt, lucrarea lui Einstein este o redescoperire a tuturor trăsăturilor esențiale ale mecanicii statistice, scrisă evident în deplina necunoaștere a faptului că cu puțin timp înainte acest domeniu a fost conturat de către Gibbs (1902 ; traducerea germană, de E. Zermello, a apărut abia în 1905). Asemănarea este de-a dreptul uluitoare. Ca și Gibbs, Einstein studiază comportarea statistică a unui ansamblu virtual de sisteme mecanice egale de tip foarte general. Starea unui sistem izolat e descrisă prin coordonate și viteze

generalizate (*lagrangene*), interpretate ca un punct în „spațiul fazelor” 2 n -dimensional. Energia este dată ca o funcție de aceste variabile. Singura concluzie din dinamica utilizată aici este teorema lui Liouville, după care, orice domeniu din spațiul fazelor cu 2 n -dimensiuni a tuturor coordonatelor și impulsurilor își conservă volumul în cursul timpului. Această formulă creează posibilitatea de a defini domenii de aceeași pondere și de a utiliza legile probabilistice. Metoda lui Einstein este de fapt identică în esență cu teoria lui Gibbs a ansamblurilor canonice. Într-a doua lucrare, din anul următor, intitulată *O teorie a bazelor termodinamicii* [2], Einstein construiește teoria pe o altă bază, nu pe cea utilizată de Gibbs, anume pe considerarea unui sistem izolat în cursul timpului (denumit de el, mai târziu, *Zeit-Gesammtheit* — ansamblul temporal), și demonstrează că acesta este echivalent cu un anumit ansamblu virtual de mai multe sisteme și anume cu ansamblul microcanonic al lui Gibbs. În concluzie, el arată că distribuția canonică și microcanonică duce la aceleași consecințe fizice. Tratarea pe care o dă Einstein acestui obiect mi se pare că e ceva mai puțin abstractă decât aceea a lui Gibbs. Aceasta se confirmă și prin faptul că Gibbs n-a adus pentru metoda sa nici un exemplu frapant, în timp ce Einstein a trecut imediat la aplicarea teoremei sale la un caz de extremă importanță, și anume la sistemele ale căror dimensiuni sînt astfel, încît se poate demonstra caracterul real al moleculei și corectitudinea teoriei cinetice a materiei.

Era vorba despre teoria mișcării *browniene*. Lucrările lui Einstein cu privire la această teorie sînt astăzi ușor de găsit într-un mic volum, pe care l-a editat și l-a completat cu adnotări R. Fürth și pe care A. D. Cowper l-a tradus în englezește [3]. În prima lucrare (1905) el se străduiește să arate „că, conform cu teoria molecular-cinetică a căldurii, corpurile de mărimi microscopic vizibile, suspendate într-un lichid, suferă, datorită mișcării moleculare termice, modificări ale poziției de asemenea ordin, încît pot fi observate cu ușurință la microscop”, și adaugă, că aceste mișcări sînt eventual identice cu „mișcarea *browniană*”, deși cunoștințele sale despre aceasta sînt prea vagi pentru a-și permite o concluzie definitivă.

Pasul hotărîtor pe care l-a făcut Einstein a fost ideea de a transforma teoria cinetică a materiei dintr-o ipoteză posibilă, accesibilă și fructuoasă, într-un obiect al observației, întrucît el a cercetat cazuri în care mișcarea moleculară și caracterul ei statistic pot fi învederate. Acesta a fost primul exemplu al unui fenomen de fluctuații termice, și metoda sa este un exemplu clasic pentru tratarea tuturor celorlalte. El consideră mișcarea particulei suspendate ca un proces de difuziune sub acțiunea presiunii osmotice și a altor forțe, dintre care cea mai importantă este frecarea, determinată de vîscozitatea lichidelor. Cheia logică pentru înțelegerea fenomenului constă în precizarea că viteza reală a particulei suspendate, produsă prin ciocnirile moleculelor din lichide, nu poate fi observată. Efectul vizibil într-un anumit interval de timp τ constă în modificările neregulate ale poziției, a căror probabilitate satisface o ecuație diferențială de același tip cu ecuația difuziunii. Coeficientul de difuziune este pur și simplu pătratul mediu al deplasării, împărțit la 2τ . Pe această cale a obținut Einstein vestita sa lege, care exprimă deplasarea rectilinie medie pentru timpul τ cu ajutorul mărimilor măsurabile (temperatura, raza particulei, vîscozitatea lichidului) și al numărului de molecule dintr-o moleculă-gram (numărul N al lui Avogadro). Simplitatea și claritatea expunerii fac ca acest articol să fie o lucrare clasică a științei noastre.

În cea de a doua lucrare (1906), Einstein vorbește despre lucrările lui Siedentopf (Jena) și Gouy (Lyon), care s-au convins prin observații că mișcarea *browniană* își are cauza într-adevăr în mișcarea termică a moleculelor lichidelor, și pornind de aici, el a considerat ca sigur faptul că „mișcarea neregulată a particulei suspendate”, pe care el a prezis-o, este identică cu mișcarea *browniană*. Această publicație și cele următoare sînt consacrate elaborării amănunțelor (de pildă, mișcării *browniene în rotație*) și expunerii teoriei în alte forme. Dar ele nu conțin nimic esențial nou.

Cred că aceste cercetări ale lui Einstein au contribuit mai mult ca toate celelalte să-i convingă pe fizicieni de caracterul real al atomului și al moleculelor, al teoriei cinetice a căldurii și de însemnătatea fundamentală a probabilităților în legile naturii. Dacă citești aceste lucrări, atunci

ești înclinat să crezi că în acea perioadă aspectul statistic al fizicii a preocupat cu preponderență spiritul lui Einstein. Cu toate acestea, el lucra în același timp la teoria relativității, în care domnește o cauzalitate strictă. În mod vădit, el a fost întotdeauna convins, și este încă și astăzi, că legile cele mai profunde ale naturii trebuie să fie înțelese cauzal și determinist, că ideea de probabilitate e necesară numai pentru a ascunde neștiința noastră, atunci când avem de-a face cu un mare număr de particule, și că numai amploarea acestei ignoranțe a promovat statistica în prima linie.

Majoritatea fizicienilor nu împărtășesc astăzi această opinie, iar cauza este dezvoltarea teoriei cuantelor. Contribuția lui Einstein la această teorie este foarte importantă. Prima sa lucrare, din anul 1905, amintită mai sus, este citată adesea ca prima introducere a noțiunii de cuante de lumină (fotoni) pentru explicarea efectului fotoelectric și a altor fenomene (legea fotoluminescenței a lui Stokes, fotoionizarea ș.a.m.d.). De fapt, argumentul principal al lui Einstein este tot de natură statistică, și fenomenele amintite sînt utilizate drept confirmare. Această gîndire statistică este foarte caracteristică pentru Einstein și lasă impresia că legile probabilistice sînt pentru el centrale, și cu mult mai importante decît orice alte legi. El pornește de la deosebirea fundamentală dintre un gaz ideal și un corp gol umplut de radiații. Gazul e constituit dintr-un anumit număr de particule, în timp ce radiația este descrisă printr-o serie de funcții în spațiu și, în acest fel, printr-o infinitate de variabile. Aici se află rădăcina dificultății de a găsi legea radiației corpului negru. Densitatea monocromatică a radiației se dovedește a fi proporțională cu temperatura absolută (relație devenită mai tîrziu cunoscută, ca legea lui Rayleigh-Jeans), factorul de proporționalitate fiind independent de frecvență, astfel încît densitatea totală devine infinită. Pentru a evita acest lucru, Planck (1900) a introdus ipoteza, după care radiația constă din cuante de mărime finită. Einstein, ce-i drept, nu folosește legea de radiație a lui Planck, ci pe aceea mai simplă a lui Wien, care este valabilă pentru cazul-limită al unei densități reduse a radiației, și se așteaptă, pe drept cuvînt, ca aici caracterul corpuscular al radiației să iasă mai clar în evi-

dență. El arată cum poate fi dedusă entropia S a radiației corpului negru dintr-o lege dată a radiației (densitatea monocromatică ca funcție de frecvență), și apoi aplică relația fundamentală a lui Boltzmann dintre entropia S și probabilitatea termodinamică W .

$$S = k \log W$$

(unde k este constanta gazelor pe moleculă), spre a-l determina pe W . Stabilind această formulă, *Boltzmann*, a urmărit să exprime mărimea fizică S prin mărimea combinatorie W , care se obține prin calculul tuturor configurațiilor posibile ale elementelor atomice din ansamblul statistic. Einstein inversează acest proces: el pornește de la funcția cunoscută S , spre a obține o expresie pentru probabilitate, care să poată fi utilizată ca o cheie pentru interpretarea elementelor statistice. (Mai târziu, el a aplicat același artificiu în lucrarea sa cu privire la fluctuațiile termice. Cu toate că aceasta este de o importanță considerabilă în practică, nu vreau decât să o amintesc aici, pentru că nu introduce nici o noțiune nouă în afară de această „inversare“).

Einstein substituie entropia dedusă din legea lui Wien în formula lui *Boltzmann* și obține, pentru probabilitatea concentrării, energia de radiație E , de frecvență, în porțiunea αV a volumului total V , formula

$$W = \alpha E / h\nu;$$

aceasta înseamnă că radiația se comportă ca și cum ar consta din $n = E/h\nu$ cuante independente de energie de mărime $h\nu$. Din textul lucrării reiese clar că acest rezultat a avut asupra lui Einstein o putere de convingere copleșitoare și că l-a determinat să caute confirmări directe. Le-a găsit în fenomene fizice mai sus amintite (de pildă, în efectul fotoelectric), care se bazează pe schimbul de energie dintre electron și lumină. Această descoperire a produs o puternică impresie asupra fizicienilor experimentatori. Faptele înseși erau cunoscute multora, dar nu se făcea legătura între ele. Talentul lui Einstein de a găsi asemenea relații intuitive era pe atunci într-adevăr neobișnuit. El se baza pe o cunoaștere temeinică a faptelor experimentale, legate de o profundă înțelegere a situației actuale a teoriei, și acest lucru îl făcea capabil să-și dea seama imediat când apărea ceva neobișnuit. Metoda sa de lucru în acea pe-

rioadă era, în esență, empirică deși el avea mereu în vedere construirea unei teorii atotcuprinzătoare, cu totul în opoziție față de lucrările sale de mai târziu, la care s-a condus în măsură crescândă de idei filozofice și matematice.

Un al doilea exemplu de aplicare a acestei metode este lucrarea sa cu privire la căldura specifică [4]. Ea începe, de asemenea, cu considerații teoretice de tipul acelor care erau pentru Einstein mai convingătoare, adică cu considerente statistice. El observă că formula de radiație a lui Planck poate fi obținută, dacă se renunță la distribuția continuă a ponderilor statistice în spațiul fazelor, care este o consecință a teoremei lui *Liouville* din dinamică. În locul distribuției continue, trebuie să admitem că în sistemele oscilatorii de tipul celor care sînt considerate în teoria radiației ca emițător și receptor, majoritatea stărilor au o pondere statistică care se anulează, și numai un număr redus dintre ele, acelea la care energiile sînt multipli întregi de cuante, au o pondere finită.

Dacă este așa, atunci cuanta nu poate fi o particularitate a radiației, ci o proprietate a statisticii fizice generale, și deci trebuie să apară și la toate celelalte fenomene unde intervin oscilații. Acest raționament pare să fi influențat în mod decisiv gîndirea lui Einstein, devenind deosebit de fructuos, datorită cunoașterii de către el a faptelor și datorită judecății sale impecabile cu privire la importanța faptelor pentru problemă. Nu știu dacă el bănuia că există substanțe solide, pentru care căldura specifică pro mol este mai scăzută decît valoarea sa normală de 5,94 calorii, așa cum e dată prin legea lui Dulong-Petit, sau dacă el a ajuns mai întîi la teorie și după aceea a cercetat tabelele pentru a găsi exemple. Legea lui Dulong-Petit este o consecință directă a legii distribuției uniforme din mecanica statistică clasică; aceasta spune că fiecare coordonată sau impuls care adaugă un termen pătratic la energie posedă aceeași energie medie, și anume $\frac{1}{2} RT$ pro mol, unde R este constanta gazelor. Deoarece R este doar cu puțin mai mic decît două calorii pro grad și mol, iar un oscilator are 3 coordonate și 3 componente ale impulsului, energia unui mol dintr-un element solid trebuie să fie pro grad de temperatură, aproximativ de $6 \times \frac{1}{2} RT$ sau $5,94 T$ calorii. La substanțele cu o valoare experimentală cu mult mai scă-

zută, așa cum este de fapt în cazul diamantului, borului, siliciului, există deci o contradicție între fapte și teoria clasică. O altă contradicție asemănătoare se găsește în cazul unor gaze cu molecule formate din mai mulți atomi. Drude a demonstrat, prin experimente optice, că în aceste molecule atomii oscilează unii față de alții. De aceea, numărul unităților oscilante dintr-o moleculă ar trebui să fie mai mare decât 6, și prin urmare căldura specifică mai mare decât valoarea Dulong-Petit. Dar lucrurile nu stau întotdeauna așa. Einstein a observat, mai departe, că din punctul de vedere clasic, este inexplicabil de ce nu contribuie electronii cu nimic la căldura specifică. A trebuit să se admită existența electronilor care oscilează în atom, spre a putea explica absorbția de raze ultraviolete ; cu toate acestea, e evident că ei nu contribuie la căldura specifică, ceea ce e în contradicție cu legea distribuției uniforme.

Toate aceste dificultăți au fost înlăturate dintr-o dată prin ipoteza lui Einstein, după care oscilatorii atomici nu urmează legea repartiției uniforme, ci legea care conduce la formula radiației, a lui Planck. În conformitate cu aceasta, energia medie a temperaturii absolute nu este proporțională, ci se micșorează o dată cu scăderea temperaturii, și anume, după o lege care depinde și de frecvențele oscilatorului. În conformitate cu cele de mai sus, la temperatura obișnuită, oscilatorii de înaltă frecvență, așa cum sînt electronii, nu contribuie cu nimic la căldura specifică, iar atomii — numai dacă nu sînt legați prea ușor sau prea rigid. Einstein a confirmat că aceste condiții sînt îndeplinite în cazul moleculelor cu mai mulți atomi, pentru care Drude a estimat frecvențele și a arătat că măsurătorile căldurii specifice a diamantelor concordă foarte bine cu noua formulă.

Nu este aici locul să discutăm amănuntele fizice ale descoperirii lui Einstein. Ea a avut o mare însemnătate pentru principiile cunoașterii în domeniul fizicii. Era de-acum încolo dovedit, că efectele cuantice nu constituie o proprietate specifică a radiației, ci o caracteristică generală a sistemelor fizice. Vechea regulă *natura non facit saltus* era dezmințită ; există discontinuități fundamentale,

și anume cuante de energie, nu numai în radiație, ci și în materia obișnuită.

În modelul unei molecule sau al unui corp solid, constituit de Einstein, aceste cuante sînt încă strîns legate de mișcarea particulelor oscilante izolate. Dar în curînd, devine clar că e necesară o generalizare considerabilă. Atomii din molecule și din cristale nu sînt de sine stătători unul față de celălalt, ci legați unul de celălalt prin forțe puternice. Din această cauză, mișcarea unei particule individuale nu este cea a unui oscilator armonic izolat, ci compunerea mai multor oscilații armonice. Purtătorul unei mișcări armonice simple nu este de loc ceva material. El este coordonata normală abstractă, binecunoscută încă din mecanica vizuală. Îndeosebi pentru cristale, fiecare coordonată normală constituie o undă staționară. Introducerea acestei idei a deschis calea spre o teorie cantitativă a termodinamicii moleculelor și cristalelor și a dovedit caracterul abstract al noii fizici cuantice, care s-a dezvoltat treptat din aceste idei. A devenit clar că legile microfizicii sînt în mod fundamental deosebite de cele ale materiei obișnuite. Nimeni nu a făcut mai mult pentru elucidarea acestor lucruri decît Einstein. Nu pot să mă refer aici la toate contribuțiile sale, ci vreau să mă mărginesc la două cercetări deosebit de proeminente. Ele au pregătit calea pentru noua micromecanică, pe care fizica a acceptat-o astăzi în cea mai largă măsură, în timp ce Einstein însuși rămîne de o parte, critic, sceptic și sperînd mereu că această perioadă va trece și că fizica se va reîntoarce la principiile clasice.

Prima dintre aceste două cercetări [5] se referă, de asemenea, la legea radiației și la statistică. Există două posibilități pentru interpretarea problemei echilibrului statistic. Prima, este calea directă; ea poate fi denumită metoda combinatorie. După ce a fost stabilită ponderea statistică a domeniilor elementare, se calculează numărul combinațiilor dintre elementele care corespund stării observabile. Numărul obținut este probabilitatea statistică W , din care pot fi obținute toate proprietățile fizice (de exemplu, entropia, prin formula lui Boltzmann). A doua metodă constă din determinarea vitezelor de desfășurare a proceselor elementare, care conduc la echilibrul considerat. Desigur, această metodă este mult mai dificilă căci

ea cere nu numai calcularea cazurilor egal probabile, ci și o cunoaștere a mecanismului eficient. În schimb, această cale duce mult mai departe, întrucât furnizează nu numai condițiile de echilibru, ci și legea vitezei de desfășurare a unor astfel de procese, care pornesc de la configurațiile ce nu se află în echilibru. Exemple clasice pentru această a două metodă sînt formulările lui Boltzmann și Maxwell date teoriei cinetice a gazelor. Aici mecanismul elementar constă în ciocnirile binare dintre molecule, al căror număr în unitatea de timp este proporțional cu numărul partenerilor în unitatea de volum. Din ecuația de ciocnire se poate deduce funcția de distribuție a moleculelor nu numai în echilibrul statistic, ci și în cazul mișcării macrofizice, a fluxului de căldură, a difuziunii ș.a.m.d. Un alt exemplu este legea acțiunii maselor, după Guldberg și Waage. Mecanismul elementar constă și aici în ciocniri repetate dintre grupuri de molecule, în cursul cărora atomii sînt reuniți, separați sau interschimbați, și anume, cu o viteză care e proporțională cu densitatea partenerilor. Un caz special al acestui proces elementar este reacția cu un singur atom, în cursul căreia moleculele de un anumit fel se divid în mai multe părți, cu o viteză proporțională cu densitatea lor. Acest caz are o importanță deosebită în fizica nucleară; acolo, el se numește legea dezagregării radioactive. În timp ce în puținele exemple din chimia obișnuită, la care s-a observat o reacție cu un singur atom, a putut fi acceptată sau chiar observată o dependență a vitezei de reacție de condițiile fizice, de pildă de temperatură, acest lucru nu este valabil în cazul radioactivității. Constanta de dezagregare părea să fie o proprietate invariabilă a nucleului, care nu poate fi influențată în nici un fel din exterior. Fiecare nucleu individual explodează într-un moment care nu poate fi prevăzut. Dacă însă va fi supus observației un mare număr de nuclee, atunci viteza medie a dezagregării este proporțională cu numărul total al nucleelor. Se pare că legea cauzalității își pierde valabilitatea în cazul acestor procese.

În legătură cu aceasta, Einstein a arătat că legea de radiație a lui Planck poate fi dedusă din procesele de acest tip, adică avînd un caracter mai mult sau mai puțin acauzal. Să considerăm două stări staționare ale unui

atom, și anume starea inferioară 1 și starea excitată 2. Einstein admite că dacă un atom se găsește în starea 2, atunci există o anumită probabilitate de a reveni la starea fundamentală 1, și anume, prin emiterea unui foton de frecvență ν_{12} , care corespunde, în conformitate cu legea cuantelor, diferenței de energie dintre cele două stări. Aceasta înseamnă că într-o mare masă de asemenea atomi, numărul atomilor în starea 2, care se întorc în unitatea de timp în starea fundamentală 1, este proporțional cu numărul lor inițial, exact ca în cazul dezagregării radioactive. Radiația produce, pe de altă parte, o anumită probabilitate pentru procesul de întoarcere $1 \rightarrow 2$, absorbția unui foton de frecvență ν_{12} , și această probabilitate este proporțională cu densitatea de radiație pentru frecvența respectivă.

Dar numai aceste două procese care restabilesc echilibrul nu ar conduce la formula lui Planck. De aceea Einstein s-a văzut silit să admită un al treilea proces, anume o influență a radiației asupra procesului de emisie $2 \rightarrow 1$, „emisie indusă“, a cărei probabilitate este, de asemenea, proporțională cu densitatea de radiație pentru frecvența ν_{12} .

Ținând seama de principiul elementar al statisticii lui Boltzmann, acest raționament extrem de simplu conduce imediat la formula lui Planck, și anume fără nici o luare în considerație a mărimii probabilităților de trecere. În legătură cu aceasta, Einstein a luat în considerație schimbul de impuls dintre atom și radiație și a arătat că mecanismul propus de el nu este în concordanță cu ideea clasică a undelor sferice, ci numai cu comportarea cuantelor asemănătoare cu cea a unor proiectile. Aici însă nu vom insista asupra acestui aspect al lucrării lui Einstein, ci vom analiza semnificația ei pentru problema fundamentală a legilor cauzale și statistice în fizică. Din acest punct de vedere, această lucrare a lui Einstein este deosebit de importantă. Căci ea a însemnat un pas decisiv în direcția unei gândiri acauzale, indeterminate. Eu știu, bineînțeles, că Einstein însuși era și mai este convins că există proprietăți structurale în atomul excitat, care determină momentul exact al emiterii, și că conceptul de probabilitate intervine în joc numai datorită cunoștințelor noastre in-

complete în ce privește preistoria atomului. Dar rămîne în picioare starea de fapt, că el a contribuit în mod esențial la răspîndirea gândirii indeterminate, statistice, și că a extins-o de la radioactivitate la alte domenii ale fizicii.

Mai trebuie amintită încă o trăsătură caracteristică a lucrării lui Einstein, care a contribuit, de asemenea, în mod remarcabil la formularea fizicii indeterminate a mecanicii cuantice. Este vorba despre faptul că din valabilitatea legii de radiație a lui Planck rezultă egalitatea probabilităților pentru absorbție ($1 \rightarrow 2$) și pentru emisia indusă ($2 \rightarrow 1$). Acesta a fost primul indiciu al faptului că interacțiunea din sistemele atomice leagă în permanență două stări în mod simetric. În mecanica clasică, un factor exterior, cum ar fi radiația, acționează asupra unei anumite stări, iar rezultatul acțiunii se poate calcula pe baza proprietăților acestei stări și a factorului exterior. În mecanica cuantică, orice proces este o trecere dintre două stări, care intră în mod simetric în expresia legii interacțiunii cu sisteme exterioare. Această proprietate de simetrie a constituit o cheie decisivă în formularea mecanicii matriceale, prima formă a mecanicii cuantice moderne. Prima indicație cu privire la această simetrie a fost dată prin descoperirea de către Einstein a egalității probabilităților de trecere îndreptate fie în sus, fie în jos.

Ultima dintre cercetările lui Einstein, pe care aș vrea s-o discut aici, este lucrarea sa cu privire la teoria cuantică a gazelor ideale cu un singur atom [6]. În acest caz, ideea inițială nu i-a aparținut lui, ci a împrumutat-o de la un fizician indian, S. N. Bose. Lucrarea acestuia a apărut într-o traducere făcută de Einstein însuși [7], care a adăugat observația că o consideră ca un pas important înainte. Punctul esențial în procedeul lui Bose era faptul că el a tratat protonii ca particule de gaz, cu metodele mecanicii statistice, dar cu ipoteza suplimentară că aceste particule sînt indiscernabile. El nu distribuie particulele individuale într-un șir de stări, ci calculează numărul stărilor, cărora le corespunde un număr dat de particule indiscernabile. Acest considerent combinatoric duce, împreună cu condițiile fizice (este dat numărul stărilor și energia totală), în mod direct la legea radiației a lui Planck. Einstein a generalizat această idee prin pro-

punerea de a aplica aceeași ordine de idei și asupra atomilor materiali, spre a obține teoria cuantică a gazelor monoatomice. Excepția de la legea obișnuită a gazelor, care poate fi dedusă din această teorie, se numește „degenerarea gazelor“. Lucrările lui Einstein cu privire la această temă au apărut exact cu un an înainte de descoperirea mecanicii cuantice. Una dintre aceste lucrări cuprinde, cu privire la tema respectivă (pagina 9 a celei de-a doua lucrări), o referire la vestita disertație a lui De Broglie și observația că fiecărui gaz i se poate atașa un câmp de unde scalar. Aceste lucrări ale lui De Broglie și Einstein l-au condus pe Schrödinger la dezvoltarea mecanicii sale ondulatorii, după cum recunoaște el însuși la sfârșitul vestitei sale lucrări cu privire la tema dată [8]. Aceeași observație a lui Einstein a servit, cu un an sau doi mai târziu, drept punte între teoria lui De Broglie și descoperirea experimentală a difracției electronilor. Căci atunci când Davisson mi-a comunicat rezultatele sale cu privire la maximele curioase care apar la reflectarea electronilor de către cristale, mi-am amintit de indicația lui Einstein și l-am îndemnat pe Elsasser să cerceteze dacă aceste maxime n-ar putea fi interpretate ca franjuri de interferență a undelor De Broglie. De aceea, Einstein este fără nici o îndoială asociat la întemeierea mecanicii ondulatorii, și nici un alibi nu poate contesta acest lucru.

Nu văd cum s-ar putea justifica numărătoarea Bose-Einstein a cazurilor egal probabile, fără a face apel la conceptele mecanicii cuantice. Aici, starea unui sistem de particule asemănătoare nu este descrisă prin prezentarea pozițiilor și impulsurilor lor individuale, ci printr-o funcție de undă simetrică a coordonatelor. Această funcție reprezintă în mod cu totul evident numai *una* dintre stări. În statistica clasică, dimpotrivă, o grupă de particule asemenea mai poate fi împărțită în multe feluri între două recipiente; chiar dacă individual particulele nu sînt determinabile, aceasta nu prejudiciază cu nimic faptul că sînt individuale. Cu toate că argumentele de acest fel sînt mai curînd metafizice decît fizice, mi se pare că este mai binevenită aplicarea unei funcții sistematice de undă la prezentarea unei stări decît contestarea individualității. Acest mod de gîndire a condus apoi, în continuare, la un

alt caz de degenerare a gazelor, descoperit de Fermi și Dirac, în care funcția de undă este antisimetrică și la o abundență de consecințe fizice, confirmate pe cale experimentală.

După cât cunosc eu, statistica Bose-Einstein a constituit ultima contribuție pozitivă, decisivă, a lui Einstein la fizica statistică. Totuși, eforturile sale de mai târziu depuse în această direcție au fost de mare importanță pentru stimularea în continuare a meditației și pentru discuții, dar în esență numai sub aspect critic. El a refuzat să recunoască pretenția mecanicii cuantice de a fi reconciliat reprezentarea corpusculară a radiației cu cea ondulatorie. Această pretenție se bazează pe o orientare pe deplin nouă a principiilor fizice: legile cauzale sînt înlocuite prin legi statistice, determinismul — prin indeterminism. Eu am încercat să arăt că Einstein a deschis el însuși calea spre acest punct de vedere. Dar filozofia sa cuprinde un principiu, care-l face să-i fie cu neputință să meargă pînă la capăt pe această cale. Care este acest principiu?

Filozofia lui Einstein nu este expusă în mod sistematic în vreo carte, spre a putea fi citită acolo. Nu rămîne decît să te supui efortului de a o extrage din lucrările sale consacrate fizicii, precum și din cîteva articole și scrieri mai generale. Nu am găsit la el nici un răspuns precis la întrebarea „ce este probabilitatea?”. De asemenea, trebuie spus că el n-a participat nici la discuțiile aprinse cu privire la definiția lui Von Mises și la alte asemenea încercări. Presupun că el le-a respins ca speculații metafizice și că a făcut chiar glume pe seama lor. El a considerat probabilitatea de la început ca pe un instrument spiritual al cercetării din domeniul științelor naturii, cu nimic deosebit de orice altă metodă științifică. El are desigur convingeri foarte precise despre valoarea instrumentelor de acest fel. Atitudinea sa față de filozofie și față de teoria cunoașterii poate fi dedusă din articolul său necrolog scris în amintirea lui Ernst Mach [9]:

„Dacă nu mă îndrept spre o știință, din motive exterioare, ca agonisirea banilor sau ambiție și nici din plăcere sportivă, din dorința unei gimnastici a minții, sau cel puțin nu exclusiv din asemenea motive, atunci, pe mine, ca învățăcel al acestei științe, trebuie să mă intereseze în mod

arzător întrebarea : ce fel de țel vrea și poate atinge știința căreia mă dăruiesc ? În ce măsură sînt «adevărate» rezultatele sale generale ? Ce este esențial, ce se bazează numai pe întîmplări ale dezvoltării ?

În același articol, ceva mai departe, el formulează după cum urmează *crezul său empiric* :

„Conceptele, care s-au dovedit folositoare cu ocazia ordonării lucrurilor, obțin cu ușurință asupra noastră o asemenea autoritate, încît uităm de proveniența lor pămîntească și le luăm ca date, de neschimbat. Ele primesc atunci pecetea de «necesități ale gândirii», «date a priori» ș.a.m.d. Calea progresului științific este adesea făcută impracticabilă pe timp mai îndelungat prin asemenea erori. De aceea, nu este de loc o joacă inutilă, dacă ne exercăm în privința analizării conceptelor de mult curente și a demonstrării împrejurărilor de care depinde îndreptățirea și utilitatea lor, a felului cum au crescut fiecare în parte, din datele experienței. În acest fel va fi înfrîntă autoritatea lor prea mare. Ele vor fi îndepărtate, dacă nu se vor putea legitima realmente, vor fi corectate, dacă atașarea lor la lucrurile date a fost prea neglijentă, vor fi înlocuite prin altele, dacă poate fi stabilit un alt sistem, pe care îl preferăm dintr-un motiv sau altul“.

Acesta este caracterul tînărului Einstein. Sînt convinși că principiile probabilistice au fost pe atunci pentru el de aceeași importanță ca toate celelalte noțiuni care sînt utilizate pentru descrierea naturii și care sînt atît de sugestiv formulate în cuvintele citate. Einstein, cel de astăzi, s-a schimbat. Redau aici cîteva fraze dintr-o scrisoare, pe care am primit-o de la el cu cîteva ani în urmă (la 7 noiembrie 1944) : „În așteptarea noastră științifică, ne-am dezvoltat la antipozi. Tu crezi în Dumnezeu care aruncă zarurile, iar eu în legitatea deplină, într-o lume care există în mod obiectiv, pe care eu încerc s-o surprind pe o cale sălbatic speculativă“. Aceste speculații diferențiază într-adevăr opera sa de astăzi de ceea ce scria odinioară. Dar dacă există în general cineva care să aibă dreptul să facă speculații, atunci acela este el, cel ale cărui rezultate fundamentale ne apar de neclintit. Ținta năzuințelor sale este o teorie generală a cîmpului, care să păstreze cauzalitatea strictă a fizicii clasice și care să limiteze

aplicarea probabilităților la camuflarea ignorării de către noi a condițiilor inițiale sau, dacă preferați, a preistoriei tuturor elementelor sistemului considerat. Nu este locul aici să răspundem la întrebarea dacă acest lucru poate sau nu poate fi obținut. Dar aş vrea să remarc un singur lucru și să mă servesc pentru aceasta de limbajul metaforic al lui Einstein: dacă Dumnezeu a făcut lumea în așa fel, încât să reprezinte un sistem mecanic perfect, atunci el a permis cel puțin rațiunii noastre imperfecte ca pentru prezicerea unor mici porțiuni de procese din acest sistem, noi să nu avem neapărat nevoie de rezolvarea unei infinități de ecuații diferențiale, ci să putem pune mâna pe zaruri cu perspective de reușită. Că lucrurile stau așa am învățat, împreună cu mulți dintre contemporanii mei, de la Einstein însuși. Cred că această situație nu s-a schimbat prea mult prin introducerea statisticii cuantice. Noi, muritorii, tot mai recurgem în scopul previziunilor noastre de mici proporții la jocul de zaruri, iar acțiunea lui Dumnezeu rămîne la fel de misterioasă în clasică mișcare *browniană*, ca în radioactivitate, sau în radiația cuantică, sau în viața întreagă în genere.

Einstein nu și-a exprimat nemulțumirea față de fizica modernă numai în mod general, la care s-ar fi putut replica cu un mod de exprimare la fel de general și de precis, ci și în lucrări foarte substanțiale, în care și-a formulat obiecțiile împotriva unor afirmații foarte precise ale mecanicii ondulatorii. Dintre acestea, cel mai cunoscut a devenit studiul său publicat împreună cu Podolsky și Rosen [10]. Faptul că acest studiu intervine foarte adînc în fundamentele logice ale mecanicii cuantice a putut fi constatat grație ecoului pe care l-a provocat. Niels Bohr a dat un răspuns amănunțit. Schrödinger a publicat propriile sale vederi pline de scepticism cu privire la interpretarea mecanicii cuantice. Reichenbach se ocupă de această problemă în ultimul capitol al excelenței sale cărți *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics* și arată că o tratare completă a dificultăților scoase la iveală de Einstein, Podolsky și Rosen cere o revizuire a logicii însăși. El introduce o logică „trivalentă”, în care pe lîngă valorile de adevăr, „adevărat” și „fals”, mai există și o valoare intermediară, pe care el o denumeste „incert”; cu alte

cuvinte, el respinge vechiul principiu al lui *tertium non datur*, ceea ce fusese deja cerut și înainte, din motive pur matematice, de către Brouwer și alți matematicieni. Eu nu sînt logician, și în asemenea dispute dau dreptate întotdeauna specialistului cu care am vorbit la urmă. Atitudinea mea față de rolul statisticii în mecanica cuantică nu pare să fie influențată de logica formală, și bănuiesc că și la Einstein lucrurile stau la fel. Faptul că părerea sa în această chestiune se deosebește de părerea mea este regretabil, dar o controversă logică între noi nu poate fi utilă. La baza divergențelor se află deosebirea între întreaga experiență de muncă și de viață. Dar cu toate acestea, el rămîne maestrul meu, căruia i se cuvine stima cea mai înaltă.

Bibliografie

- [1] „Ann. Phys.” (seria a 4-a), **9** (1902), p. 477.
- [2] „Ann. Phys.” (seria a 4-a), **11** (1903), p. 170.
- [3] R. F ü r t h, *Fenomene de fluctuație în fizică*, Friedr. Vieweg. & Sohn, Braunschweig (1920); A. D. C o w p e r, *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*, Methuen & Co, London (1926).
- [4] *Teoria planckiană a radiației și teoria căldurii specifice*, în „Ann. Phys.” (seria a 4-a), **22** (1907), p. 180.
- [5] *Contribuții la teoria cuantică a radiației*, în „Phys. Z., Jg.”, **18** (1917), p. 121.
- [6] „Berliner Ber.”, 1924, p. 261; 1925, p. 318.
- [7] S. N. B o s e, în „Z. Phys.” **26** (1924), p. 178.
- [8] *Cuantificarea ca problemă a valorii proprii*, în „Ann. Phys.” (seria a 4-a), **70** (1926), p. 361, comp. p. 373.
- [9] „Phys. Z.” **17** (1916), p. 101.
- [10] A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, în „Phys. Rev.” **47** (1935), p. 777.

*Fizică și metafizică**

Subiectul pe care aş vrea să-l tratez se află la graniţa a două domenii de cercetare ; de aceea, v-aţi putea aştepta ca eu să le cunosc bine pe amîndouă. Dar, cu toate că mă simt pe un teren destul de solid atunci cînd vorbesc despre fizică, nu pot avea totuşi în nici un chip pretenţia de a fi un specialist în acel domeniu, care în mod uzual, în cărţile şi expunerile de filozofie, este tratat sub titlul de „metafizică“. Ceea ce ştiu despre acest domeniu se constituie doar din amintiri mai mult sau mai puţin clare din perioada studenţiei mele, împrăştiate prin oarecari lecturi sporadice. Anii îndelungaţi de delăsare nu au putut totuşi distruge impresia puternică pe care au lăsat-o asupra-mi, în tinereţea mea, încercările străvechi de a răspunde la întrebările cele mai arzătoare ale spiritului uman : întrebările privitoare la sensul ultim al existenţei, la univers în ansamblu şi la rolul nostru în univers, la viaţă şi moarte, adevăr şi eroare, virtute şi viciu, Dumnezeu şi veşnicie. Dar tot atît de profundă ca această impresie despre importanţa problemei este amintirea despre zădărnici strădaniilor de a le rezolva. Se părea că nu există nici un progres continuu, de felul celui pe care îl întîlnim în ştiinţele particulare. Ca atîţia alţii, am întors şi eu spatele filozofiei şi am găsit satisfacţii pe un cîmp limitat, unde problemele pot fi soluţionate într-adevăr.

* *Joule Memorial Lecture*, 1950. Tradus din limba engleză după *Memoirs and Proceedings of the Manchester Library and Philosophical Society*, vol. 91, şi publicat în „Naturwissenschaftlicher Rundschau, 1955, p. 295.

Numai că acum, cînd am început să îmbătrînesc, simt și eu, la fel cu mulți alții, ale căror forțe de creație descresc, dorința de a strînge într-un mănunchi rezultatele cercetării științifice, la care am avut și eu o mică parte de-a lungul mai multor decenii, ceea ce mă readuce inevitabil la acele întrebări veșnice, care circulă sub titlul de „metafizică“.

Dați-mi voie să citez două dintre definițiile date metafizicii de către unii filozofi moderni. *William James* spune : „Metafizica este o năzuință deosebit de perseverentă de a gândi clar“. *Bertrand Russell* spune : „Metafizica sau încercarea de a cuprinde prin gîndire lumea ca un întreg“. Aceste formulări subliniază două laturi importante. Una subliniază metoda : gîndire perseverentă, clară ; cealaltă — obiectul : lumea ca un întreg. Dar oare orice caz de gîndire perseverentă, clară, este metafizică ? Fiecare naturalist, fiecare istoric, filozof și chiar fiecare teolog ar ridica pretenția că el gîndește clar. Pe de altă parte, lumea ca întreg este un obiect care nu numai că este uriaș de mare, dar probabil că nu este nici închis, un obiect care oferă în orice moment posibilitatea unor noi descoperiri, și de aceea nu este epuizat, fiind probabil inepuizabil în genere. Pe scurt : lumea, pe care noi o cunoaștem, nu este niciodată un întreg. La aceasta voi mai reveni în încheiere.

Propun să folosim cuvîntul „metafizică“ într-un sens mai modest, atît în ce privește metoda, cît și în ce privește obiectul, și anume ca : „cercetare a trăsăturilor generale caracteristice ale structurii lumii, precum și a metodelor noastre de a aprofunda această structură“. Vreau să examinez îndeosebi chestiunea dacă fizica a contribuit cu ceva esențial la lămurirea acestei probleme. Progresul fizicii a fost, după cum știm cu toții, destul de tulburător în cursul ultimilor cîțiva ani, iar imaginea fizică a lumii s-a schimbat de la un cap la celălalt în jumătatea de secol a propriei mele vieți de om de știință. În aceeași perioadă, metodele fizicianului au rămas în esență mereu neschimbate : el pregătește experimente, observă regularitățile, le formulează pe acestea în legi matematice, prevede cu ajutorul acestor legi fenomene noi, reunește diferitele legi empirice în teorii coerente, care să satisfacă

nevoia noastră de armonie și frumusețe logică și, în sfârșit, pune la încercare aceste teorii prin previziuni. Previziunile cu rezultate bune sînt punctele culminante ale fizicii teoretice, de felul celor pe care le-am apucat în cursul epocii noastre, în cazul undelor De Broglie, al pozitronilor descoperiți de Dirac, al mezonilor descoperiți de Yukawa și în multe alte cazuri de acest fel.

Capacitatea de a face previziuni este principalul merit al fizicii. Ea se bazează pe recunoașterea principiului cauzalității, care în forma sa cea mai generală înseamnă acceptarea legilor imuabile ale naturii. Este însă cunoscut de toată lumea faptul că fizica modernă s-a văzut silită să pună acest principiu sub semnul întrebării. Cu aceasta, am ajuns la prima noțiune metafizică, în legătură cu care aș vrea să expun unele păreri.

În strînsă legătură cu ea este modul de reprezentare a realității. Atitudinea sceptică față de cauzalitate s-a ivit în fizica atomică, unde obiectele nu sînt în mod direct accesibile simțurilor noastre, ci numai indirect, cu ajutorul unor aparate mai mult sau mai puțin complicate. Aceste obiecte ultime ale fizicii sînt particulare, forțe, cîmpuri ș.a.m.d. Ce fel de realitate poate să le fie atribuită? Problema ne conduce la chestiunea mai generală a conexiunii dintre subiect și obiect, a existenței unei lumi fizice obiective, independente de subiectul care observă, și astfel revenim la chestiunea pusă de Russell, dacă este posibilă în realitate o reprezentare a lumii în ansamblu.

Relația dintre cauză și efect este utilizată în viața de toate zilele în două feluri cu totul deosebite, care pot fi lămurite prin următoarele două propoziții: „sistemul capitalist este cauza crizelor economice” și „criza economică din anul 1930 a fost provocată de o panică la bursa din New York”. Prima propoziție stabilește o regulă generală sau o lege, independentă de scurgerea timpului; a doua, lămurește că un anumit eveniment a fost în timp urmarea necesară a unui alt eveniment. Ambele cazuri au în comun ideea necesității. Este vorba despre o noțiune oarecum mistică, pentru a cărei analiză mai profundă mă simt cu totul incapabil și pe care sînt gata să o recunosc ca metafizică. Fizica clasică a acceptat în mod oficial cea de-a doua formă a cauzalității, ca o urmare necesară în timp.

Aceasta își are rădăcina în descoperirea legilor fundamentale ale mecanicii de către Galilei și Newton. Aceste legi permit previziunea unor evenimente viitoare din cele ce s-au petrecut înainte sau invers. Cu alte cuvinte, ele sînt deterministe. O lume care ar fi dominată numai de asemenea legi ar fi o mașină gigantică. Cunoașterea deplină a situației de la un moment dat ar determina situația din orice alt moment. Această formă a determinismului a fost considerată de către fizicienii din secolul trecut ca singura interpretare rațională a cauzalității; în măsura în care făceau uz de această interpretare, ei se lăudau de a fi înlăturat din fizică ultimile rămășițe ale gândirii metafizice.

Mie mi se pare acum că această punere pe același plan a determinismului și a cauzalității este arbitrară și derutantă. Există relații deterministe care nu sînt cauzale, de pildă, orice intinerar sau orice succesiune dintr-un program. Pentru a lua un caz întru totul banal: pe baza unui program de varietăți, se poate prevedea foarte bine ordinea în care urmează una după alta scenele, dar ar fi dificil de afirmat că acrobații din scena a cincea au pricinuit scena următoare de dragoste. Să revenim la știință! Sistemul lui Ptolemeu este o interpretare deterministă, dar nu cauzală. Același lucru se poate spune despre cercurile lui Copernic și despre elipsele lui Kepler. În terminologia științifică uzuală, ele sînt descrieri cinematice, dar nu sînt de loc explicații cauzale. Căci nu se indică nici o cauză a fenomenelor, în afară de cauza ultimă, care se află în voința creatorului. Apoi au urmat teoriile dinamice ale lui Galilei și Newton. Dacă se menține cu strictețe teza după care singurul scop al teoriei ar fi previziunea deterministă, atunci progresul pe care l-a adus introducerea dinamicii în astronomie s-ar reduce, la urma urmei, la o considerabilă prescurtare și simplificare a legilor. Atunci cînd, cu 50 de ani în urmă, studiam în Germania, acest punct de vedere predomina în formularea dată de Kirchhoff: scopul cercetării naturii este o descriere concisă a proceselor. Acest punct de vedere mai este și azi împărtășit de către cercuri largi.

Cred că descoperirea mecanicii a fost o chestiune mult mai fundamentală. Galilei a arătat că o anumită mărime,

legată de mișcarea pe care o face un corp în cădere, și anume accelerația, este independentă de corp și de viteză, și depinde numai de poziția corpului în raport cu Pământul. Newton a arătat relația corespunzătoare pentru planete, unde accelerația depinde numai de distanța de la Soare. Aceasta mi se pare că este ceva mai mult decât o descriere prescurtată și eficientă a stărilor de fapt. Ea înseamnă introducerea unei exprimări cantitative a relației dintre cauză și efect în forma cea mai generală, cu ajutorul conceptului de forță. Cu aceasta, este introdusă ideea, străină de teoriile cinematice mai vechi, după care o grupă de date (în exemplul nostru : poziții) „cauzează“ o cu totul altă grupă de date (în exemplul nostru : accelerații). Cu-vîntul „cauzează“ înseamnă exact „determină cantitativ“, iar legea forței exprimă fiecare caz în parte, cum anume depinde efectul de cauză.

Această interpretare a legilor mecanicii concordă cu practica cotidiană a omului de știință. Se pregătește un experiment, adică sînt create anumite condiții de observare ; apoi se observă efectul, cîteodată la un moment ulterior, dar mai des în toată perioada în care condițiile sînt în vigoare. Este acea relație atemporală dintre observație și condițiile de observare (aparatură), care constituie obiectul real al științelor naturii. Din punctul meu de vedere, acesta este adevăratul sens al principiului cauzalității — spre deosebire de determinism, care exprimă o proprietate particulară și aproape întîmplătoare a legilor mecanicii (care se realizează pentru că aici o clasă de mărimi care intervin sînt accelerații, adică derivate în raport cu timpul).

Dacă se va lua în considerație, din acest punct de vedere, istoria fizicii în cursul ultimilor secole (așa cum am încercat în expunerile mele de la Waynflete, care au apărut sub titlul *Natural Philosophy of Cause and Chance*), se obține următoarea impresie.

În practica sa cotidiană, fizica utilizează tocmai această relație atemporală dintre cauză și efect, dar în interpretarea teoretică aplică un alt concept. Teoria consideră cauzalitatea ca avînd aceeași însemnătate cu determinismul, și deoarece forma deterministă a legilor mecanice este un fapt empiric, această interpretare a fost salutată ca un

mare succes în năzuința spre înlăturarea conceptelor metafizice întunecate. Cu toate acestea, conceptele respective au un fel curios de a se impune. În viața de toate zilele cauzalitatea are două indicii, pe care le voi numi, din dorința de a fi cât mai scurt, principii ale acțiunii din aproape în aproape (*contiguity*) și ale succesiunii (*antecedence*). Primul principiu arată că lucrurile pot acționa numai asupra lucrurilor învecinate sau printr-o înlănțuire de lucruri care vin în atingere unele cu altele; al doilea afirmă că o cauză trebuie să premerge efectului, atunci când cauzele și efectele se referă la situații din timpuri diferite.

Ambele principii sînt încălcate prin mecanica lui Newton, deoarece gravitația acționează peste orice distanță în spațiul vid și deoarece legile mișcării leagă între ele două configurații în timpuri diferite, într-un mod pe deplin simetric și reversibil. Întreaga dezvoltare a fizicii clasice poate fi privită ca o luptă pentru restabilirea acestor două trăsături esențiale ale conceptelor de cauză și efect. Procedeele utilizate pentru stăpînirea cu mijloace matematice a acțiunii din aproape în aproape au fost dezvoltate de către Cauchy și alții, care au extins mecanica la mediile continue. Ideea acțiunii din aproape în aproape a jucat un rol conducător în cercetările lui Faraday cu privire la electricitate și magnetism, și a dus la reprezentarea de către Maxwell a unui cîmp de forțe care se propagă cu o viteză finită. Acest lucru a fost în curînd confirmat prin descoperirea undelor electromagnetice de către Hertz. Pînă la urmă, legile de mișcare ale lui Newton au fost aduse în concordanță cu acțiunea din aproape în aproape prin teoria relativistă a lui Einstein a cîmpului gravitațional. Nu se poate concepe nici o teorie modernă a interacțiunii, care ar încălca acest principiu.

Principiul succesiunii a avut o istorie cu mult mai complicată și n-a avut un sfîrșit fericit. A fost nevoie de mult efort, pînă s-a descoperit că în fizică deosebirea dintre trecut și viitor este legată de ireversibilitatea fenomenelor termice și pînă ce acest rezultat a fost făcut compatibil cu reversibilitatea mecanicii, prin evoluția teoriei atomice și a metodelor statistice. Cred că acest rezultat, care se bazează pe lucrările lui Maxwell, Boltzmann, Gi-

bbs și Einstein, reprezintă unul dintre cele mai mari succese științifice în genere. Interpretarea deterministă a cauzalității putea să se mențină pentru lumea atomică, și totuși valabilitatea aparentă a principiului succesiunii să fie înțeleasă ca un efect al legii statistice a numerelor mari. Cu toate acestea, interpretarea respectivă purta în sine predispoziția spre autonimicire a uneia din coloanele sale de susținere. Ea a deschis calea pentru studiul lumii atomilor, care a ajuns pînă la urmă la rezultatul că valabilitatea prezumptivă a mecanicii lui Newton nu concordă cu microuniversul. Noua mecanică cuantică nu permite nici o interpretare deterministă; dar, deoarece fizica clasică a considerat cauzalitatea egală cu determinismul, se pare că a sosit ultimul ceas pentru explicarea cauzală a naturii.

Eu nu împărtășesc de loc acest punct de vedere însă în cadrul dezbatărilor dintre savanții care știu exact despre ce este vorba, punctul meu de vedere nu contează prea mult. Devine însă dăunător dacă este folosit la explicarea celor mai noi cuceriri ale științelor naturii pentru cei care nu sînt oameni de știință. Extremele aduc întotdeauna pagube. Concepția determinist-mecanicistă a dat naștere la o filozofie care a închis ochii în fața celor mai evidente fapte experimentale. Dar o filozofie care respinge nu numai determinismul, ci o dată cu aceasta și orice cauzalitate, mi se pare că este la fel de absurdă. Eu cred că există o definiție rațională a relației dintre cauză și efect, pe care am mai amintit-o, și care constă în faptul că o anumită situație depinde de alta (neluînd în seamă timpul) într-un mod care poate fi descris prin legi cantitative.

Voi arăta acum în ce sens mai este valabil acest lucru și în mecanica cuantică, în ciuda caracterului său indeterminist, și în ce sens este compensată pierderea aparentă printr-un alt principiu fundamental, denumit complementaritate, care are o mare importanță filozofică și practică.

Trebuie să-i mulțumim pentru acest concept nou lui Niels Bohr, marele fizician danez, care a fost unul dintre conducători în dezvoltarea mecanicii cuantice, nu numai în ceea ce privește fizica însăși, ci și cu privire la re-

percusiunile filozofice. Voi încerca să schitez ideile principale și să le confrunt cu formulările mele întrucâtva diferite.

După cum se știe, legea fundamentală a teoriei cuantelor, formulată de Planck, leagă o energie E cu o frecvență ν prin formula simplă $E = h \nu$, unde h este o constantă. Această lege a fost mai târziu extinsă de către Einstein și De Broglie, de la numărul ν de oscilații pe unitatea de timp, la numărul κ de unde pe unitatea de lungime, care este legată cu un impuls mecanic p prin formula corespunzătoare $p = h \kappa$ — cu aceeași constantă h .

Faptul că acest lucru se petrece întocmai a fost confirmat de nenumărate experimente directe și de concluzii mai mult sau mai puțin indirecte din observații. Întotdeauna, atunci când un proces poate fi descompus în componente periodice cu perioade precise în timp și în spațiu — adică cu ν și κ bine determinați — acțiunea sa asupra mișcării particulelor constă în transmiterea de energie și impuls, conform acestei legi. Este vorba despre un fapt empiric, care trebuie acceptat ca incontestabil, înainte de a trece la examinarea concluziilor respective.

Bineînțeles că acest fapt este atât de extraordinar, de ciudat, încât au trecut mulți ani pînă ce fizicienii au început să-l ia cu seriozitate în considerație. Însuși Niels Bohr a avut nevoie de cuvîntul „irațional“ pentru a descrie noua trăsătură a lumii fizice descoperite de către Planck. De ce irațional? Deoarece energia și impulsul unei particule sînt prin definiție relative la un domeniu extrem de mic din spațiu, practic un punct, în timp ce frecvența și numărul de unde — iarăși prin definiție — se referă la un domeniu foarte mare, practic infinit, al timpului și spațiului. Acest ultim fapt nu pare tot atât de evident nemijlocit. Cînd se spune: „Aud bine definit sunetul unei coarde de pian, chiar dacă e lovită în cel mai iute stacato“, atunci aceasta se potrivește, pentru că urechea noastră nu este un instrument prea sensibil pentru a percepe denaturări neînsemnate. Dar un inginer de transmisie știe foarte bine că printr-un stacato apare o distorsiune. Un unet care durează numai un timp scurt în comparație cu perioada sa de oscilație nu mai este curat, ci însoțit de

alte sunete, ale căror frecvențe se întind pe un interval $\Delta\nu$, în jurul intervalului inițial. Dacă durata devine mereu mai scurtă, atunci intervalul devine din ce în ce mai larg, pînă ce, la sfîrșit, nu se mai aude nici un sunet, ci numai o larmă, un zgomot scurt. Deoarece telecomunicațiile moderne se bazează pe principiul modulației, adică pe faptul că un curent alternativ de înaltă frecvență va fi întrerupt în ritmul semnalului sau va fi modulat în tăria sa conform cu oscilațiile relativ încete ale vorbirii sau ale muzicii, este evident că în ceea ce privește perfecțiunea transducerii există o limită. Dacă Δt este durata unui sunet de frecvență ν , atunci există o limită relativă a posibilității de recunoaștere, care este dată după ordinea de mărime prin $\Delta t \Delta \nu \approx 1$. Analiza matematică a acestor relații a fost realizată pentru prima dată de către Fourier într-un studiu cu privire la propagarea căldurii prin conductibilitate, cu aproape un secol și jumătate în urmă. Esențial este că oscilația ideală sau armonică unică, careia i se poate atribui o frecvență exactă, apare în graficul timp-amplitudine ca tren nesfîrșit de unde sinusoidale. Orice altă curbă, de pildă o undă limitată de un anumit interval de timp, reprezintă o suprapunere de unde armonice și are un întreg „spectru” de valori ν . La fel stau lucrurile și pentru undele care se propagă în spațiu, la care, în afară de periodicitatea temporală, intervine și una spațială, măsurată prin numărul de unde κ . Între lungimea Δl a unui tren de unde și lărgimea $\Delta \kappa$ a spectrului κ există relația $\Delta l \Delta \kappa \approx 1$. Nu există nici un alt mod logic de tratare a proceselor periodice sau a undelor, în afară de această analiză-Fourier. Aplicațiile practice au confirmat valabilitatea teoriei.

Să revenim la fizica cuantică! „Iraționalitatea” poate fi formulată acum mai precis. Spre a defini pe ν și pe κ în mod precis, trebuie să îi considerăm pe $\Delta \nu$ și pe $\Delta \kappa$ foarte mici. Din această cauză, durata temporală $\Delta t \approx 1/\Delta \nu$ și întinderea spațială $\Delta l \approx 1/\Delta \kappa$ sînt atunci foarte mari. Pînă acum totul se petrece ca în cazul acusticii sau a transducerii informațiilor, și nu e nimic în mod deosebit uimitor. Dacă însă se folosesc relațiile $E = h \nu$ și $p = h \kappa$ și condițiile de mai sus se scriu sub forma $\Delta t \Delta E \approx h$, $\Delta l \Delta p \approx h$, atunci se ivește situația paradoxală că particulă

mici, cu energii și impulsuri mari (adică ΔE și Δp mici), sînt asociate cu intervalele lungi de timp și de spațiu Δt și Δl . Se pune întrebarea, care poate fi importanța lui Δt și Δl ?

Singurul răspuns este că ele reprezintă limite pentru stabilirea poziției particulei în timp și spațiu. În realitate, ele nu sînt nimic altceva decît mult-discutatele relații de imprecizie ale lui Heisenberg.

Așa se înțelege faptul că încă primele legi cuantice conduc cu necesitate la limitarea reciprocă a exactității care poate fi atinsă în ce privește, pe de o parte, determinarea locului în spațiu și timp și, pe de altă parte, determinarea energiei și impulsului. După cum a subliniat Bohr, aici ne aflăm în fața unei alternative logice. Sîntem nevoiți ori să punem la îndoială un uriaș material experimental care confirmă legile cuantice $E = h\nu$ și $p = h\kappa$, ori să admitem existența unor limite în ce privește determinarea perechilor de mărimi ca timpul și energia, coordonata locului și impulsul, mărimi care în limbajul mecanicii poartă denumirea de conjugate. Lucrul cel mai demn de remarcat este, desigur, faptul că, în ciuda situației fundamentale pe deplin noi și revoluționare, a fost posibilă dezvoltarea unei mecanici cuantice, care reprezintă o generalizare directă a mecanicii clasice, extrem de simplă în forma sa matematică și considerabil mai perfectă în structura sa. Desigur că procedeul simplu de a descrie mărimi variabile ca funcții de timp a trebuit să fie părăsit și a trebuit să fie introdusă o metodă mai abstractă, în care mărimile fizice sînt reprezentate prin simboluri necomutative (simboluri, cu care se pot forma sume și produse, în cazul cărora însă valoarea unui produs depinde de ordinea factorilor). Nu voi uita niciodată emoția care m-a cuprins atunci cînd am reușit să rezum ideile lui Heisenberg cu privire la condițiile cuantice în misterioasa ecuație $pq - qp = h/2\pi i$, care este punctul central al noii mecanici și care, după cum s-a văzut mai tîrziu, include totodată și relația de imprecizie.

Trecerea de la simboluri la mărimi măsurabile reale are loc prin introducerea unei mărimi, care se numește „funcție de undă”. Ea descrie starea în care se găsește un sistem, în măsura în care o asemenea descriere e posi-

bilă. Pătratul ei exprimă densitatea probabilității, ceea ce înseamnă că valorile date (de exemplu, coordonatele particulelor) pot fi întâlnite într-un anumit domeniu de mici dimensiuni, corespunzător funcției de repartiție din statistica obișnuită. Există totuși o diferență fundamentală. Să admitem că densitățile de repartiție a două fascicule de particule care pornesc de la aceeași sursă, dar sînt calculate separat, dau ca rezultat ψ_1^2 și ψ_2^2 . Dacă apoi printr-un dispozitiv convenabil le suprapunem, se obține: $(\psi_1 + \psi_2)^2$. Aceasta se deosebește însă de suma $\psi_1^2 + \psi_2^2$ (prin $2\psi_1\psi_2$). Se obține o „interferență“ de probabilități, de felul celei bine cunoscute din cazul cuantelor de lumină sau al fotonilor — a acelor particule a căror frecvență se măsoară prin pătratul intensității unei unde electromagnetice. Nu pot însă intra aici într-o prezentare tehnică a mecanicii ondulatorii, care a fost dezvoltată prin perspicacitatea lui Schrödinger, Dirac, Pauli, Jordan și alții, pe fundamentul pus de către De Broglie. Este suficient să spunem că o funcție ondulatorie ψ reprezintă un pachet de unde armonice a diverși v și λ și că mărimile fizice de felul coordonatelor, impulsurilor, energiilor (q, p, E) sînt operatori care modifică funcțiile de undă și astfel determină intensitatea componentelor armonice ale pachetului, din care se obține, prin ridicarea la pătrat probabilitatea apariției particulelor cu $E = h\nu$ și $p = h\lambda$ date.

Astfel, noua mecanică este prin natura sa statistică și — în ceea ce privește repartiția particulelor — pe deplin indeterministă. Cu toate acestea, ea păstrează, destul de curios, o anumită asemănare cu mecanica clasică, deoarece legea de propagare a funcției ψ , așa numita ecuație a lui Schrödinger, este de același tip cu ecuația undelor din teoria elasticității sau din electromagnetism. De aici obținem situația de-a dreptul paradoxală, că determinismul nu există pentru asemenea obiecte cum sînt particulele mici, dar există pentru probabilitatea apariției lor. În orice caz, determinarea funcției cere cu mult mai multe date decît cele cu care eram obișnuți în mecanica clasică (pozițiile inițiale și vitezele particulelor). Ea cere într-adevăr o cunoaștere — sau cel puțin o cunoaștere ipotetică — a lui ψ pretutindeni, la un anumit timp și la frontierele locului respectiv din spațiu pentru toate timpurile. Cu alte

cuvinte, se pot face previziuni, chiar și în ce privește probabilitățile, numai ținând seama de ansamblul situației și de aparatul utilizat. Mai întâi trebuie să ne decidem ce caracteristică cercetăm și apoi să construim instrumentul corespunzător. Atunci efectul poate fi prezis ca o probabilitate de apariție a particulelor, în condițiile experimentului. Aceasta este în deplină concordanță cu sensul propus de mine pentru cauzalitate. Aici se postulează reprezentarea metafizică, ireductibilă, a necesității în relația dintre două feluri de lucruri, și aceasta este trăsătura caracteristică a atitudinii științifice față de lume.

Recapitulând pe scurt, avem dreptul să spunem: în timp ce fizica clasică admite că fenomenele din natură se desfășoară în mod independent de faptul observării lor și că pot fi descrise fără nici o referire la observarea lor, fizica cuantică are pretenția ca un fenomen să fie descris și prezis numai în raport cu un mod bine definit de observație sau de instalație instrumentală. Dar firește că pentru observarea aceleiași clase de fenomene pot fi utilizate diferite instrumente. De pildă, propagarea luminii poate fi supusă cercetării fie prin prisme, fie prin instalații reticulare, cu ajutorul plăcilor fotografice sau al contorului Geiger. Dacă, din punctul de vedere al mecanicii cuantice, trebuie să fie luată în considerație fiecare instalație separat, atunci care este caracteristica comună? Dacă, de exemplu, putem determina cu ajutorul unei instalații distribuția spațială a electronilor, iar cu ajutorul altei instalații distribuția energiilor lor, cum putem să ne dăm seama dacă și în ce moment am epuizat toate posibilitățile?

Niels Bohr a cercetat în mod amănunțit această chestiune, sub denumirea de „complementaritate”. Ce-i drept, el își prezintă ideile într-o formă ceva mai diferită. El este interesat îndeosebi să arate prin exemple simple cum pot fi înțelese în mod intuitiv o situație experimentală în ansamblul ei precum și incompatibilitatea și comportarea complementară a două asemenea situații. El utilizează în acest scop numai principiul impreciziei, în forma sa cea mai simplă. Cred că motivul, datorită căruia el a cheltuit atîta ingeniozitate și osteneală pentru acest proiect, este împrejurarea tragică că orientarea filozofică inițiată de el, pe care o susțin și eu aici și care a fost acceptată de în-

treaga comunitate internațională a specialiștilor în fizica atomică, n-a găsit înțelegere tocmai la acei savanți, care au contribuit în cea mai mare măsură la elaborarea teoriei cuantelor : Planck și Einstein. Planck a manifestat întotdeauna multă precauție față de concluziile revoluționare care decurg din propria sa descoperire. Einstein a mers însă mai departe și s-a străduit, de repetate ori, să arate, prin exemple simple, că renunțarea la determinism și la conceptul tradițional de realitate obiectivă a ceea ce se petrece în natură este inconsistentă. Bohr a studiat aceste exemple în colaborare cu Rosenfeld. În fiecare caz în parte, obiecțiile lui Einstein au putut fi combătute cu argumente temeinice printr-o cercetare mai amănunțită a situației experimentale. Principala sa obiecție este că un instrument constituie, după definiția care îi e proprie de la începutul începuturilor, un sistem fizic, a cărui construcție poate fi descrisă în limbajul obișnuit și care funcționează în conformitate cu condițiile mecanicii clasice. Aceasta este într-adevăr singura cale pe care ne putem înțelege unii cu alții cu privire la chestiunea respectivă. De pildă, orice precizare a unui loc cere un sistem rigid de referință și orice măsurare a timpului pretinde un ceas mecanic, în timp ce, pe de altă parte, precizarea impulsului și a energiei cere o înfrângere a rigidității și a legăturii mecanice, și anume, o parte a instrumentului, care să se poată mișca în mod liber, la care să poată fi aplicate legile conservării. Bohr arată acum că aceste două tipuri de instalații de aparate se exclud și se întregesc reciproc — în concordanță exactă cu datele teoriei. Dacă folosim o diafragmă cu fantă pentru a stabili o coordonată a unei particule care trece prin ea, atunci această diafragmă trebuie să fie legată în mod rigid cu instrumentul. În cazul că vrem să cunoaștem doar dacă o particulă a trecut într-adevăr prin fantă, atunci acea parte a aparatului care înregistrează trecerea particulei trebuie să fie mobilă și să poată să cedeze. Nu pot fi obținute și una și alta în același timp. Întrucât această complementaritate este luată în considerație, experimentul poate fi descris în mod necontradictoriu. O prezentare amănunțită a acestor chestiuni poate fi găsită în cartea *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher* (editor P. A. Schilpp; a se

vedea și studiul *Teoriile statistice ale lui Einstein*, din volumul de față), care conține studii ale multor filozofi și fizicieni teoreticieni cu privire la diferite aspecte ale operei lui Einstein, printre care cel al lui Niels Bohr (și unul al meu). Lucrarea începe cu o autobiografie științifică a lui Einstein și se încheie cu un studiu cuprinzător în care el ia atitudine față de opiniile exprimate în celelalte articole. Este o lectură deosebit de fascinantă, dar, cu toată venerația pentru marele fizician, nu pot fi de acord cu argumentele sale îndreptate împotriva filozofiei specialiștilor în fizică cuantică. Toate punctele esențiale sînt tratate de Bohr în articolul său, în care dă o dare de seamă interesantă asupra unui șir de discuții pe care le-a purtat cu Einstein. Acesta persistă însă în contraziceri și își exprimă convingerea fermă că teoria actuală, cu toate că e logic concludentă, constituie totuși o descriere incompletă a unor sisteme fizice. Argumentele sale principale nu se întemeiază atît pe considerente cu privire la cauzalitate, cît mai ales pe noua atitudine față de importanța realității fizice, pe care aceste sisteme o includ. Aș vrea să citez aici cîteva cuvinte ale lui Einstein (p. 672) :

„Pentru mine, este mai firesc să presupun că formularea adecvată a legilor generale cuprinde toate elementele conceptuale necesare pentru o descriere completă” — mai firesc, în comparație cu ideile celorlalți specialiști în fizica cuantică. El se menține cu insistență la părerea că emiterea eventuală a unei particule de către un atom radioactiv trebuie să aibă loc cu o energie anumită, la un moment anumit, care poate fi prevăzut de teorie ; în caz contrar, el numește descrierea „conceptual incompletă”. Și totuși, el a fost cel care în cazul relativității ne-a obișnuit cu un alt mod de gîndire. Există aici o infinitate de sisteme inerțiale echivalente, dintre care fiecare poate fi acceptat cu aceleași drepturi ca fiind în repaus. Nu există însă nici o posibilitate de a decide în mod experimental dacă vreunul dintre ele este cu adevărat în repaus absolut. Adversarii lui Einstein s-au referit atunci la faptul că ei consideră că „conceptual incompletă” orice descriere a lumii care neagă existența unui sistem în repaus absolut, chiar dacă nu ar exista nici o posibilitate pentru aflarea

sa. Acest argument antirelativist este la fel de puternic ca și cel anticuantistic al lui Einstein.

Generația din care fac parte Einstein, Bohr, și căreia îi aparțin și eu, a fost învățată că există o lume fizică obiectivă, care se dezvoltă în conformitate cu legile imuabile, care sînt independente de noi. Noi urmărim această desfășurare a evenimentelor, la fel cum urmărește publicul dintr-un teatru desfășurarea unei piese. Einstein nu renunță la ideea că aceasta trebuie să fie relația dintre observatorul științific și obiectul său. Cu toate acestea, mecanica cuantică interpretează în alt fel experiența cîștigată în fizica atomică. Noi nu putem compara pe observatorul unui fenomen fizic cu publicul care asistă la o reprezentație teatrală, ci mai degrabă cu cel de la un meci de fotbal, unde actul de a fi spectator, însoțit de aplauze sau de fluierături, are o influență categorică asupra vitezei și concentrării jucătorului, și în acest fel asupra cursului evenimentelor observate. O comparație și mai bună poate fi făcută cu viața însăși, unde publicul și autorii sînt aceleași persoane. Activitatea experimentatorului este aceea care planifică aparatul și predetermină trăsăturile esențiale ale observațiilor. Nu există deci nici o situație obiectivă de felul celei admise în fizica clasică. Nu numai Einstein, ci și alții, care nu resping interpretarea dată de noi mecanicii cuantice, au afirmat că, în aceste condiții, nu există nici o lume exterioară obiectivă și nici o deosebire precisă între subiect și obiect. Bineînțeles că aici se află un grăunte de adevăr, dar eu consider că această formulare nu este prea fericită. Căci ce înțelegem noi atunci cînd vorbim despre o lume care există în mod obiectiv? Înțelegem un concept preștiințific, pe care un om simplu nu-l va pune niciodată la îndoială. Cînd vede un cîine, atunci el vede un cîine, indiferent dacă cîinele stă acum lîngă el sau se zbenguie încoace și încolo, sau dacă se îndepărtează fugind și dispăre ca o pată infimă. Toate aceste nenumărate și extraordinar de diferite impresii senzoriale se reunesc în subconștient în conceptul unic de „cîine” și rămîne mereu același cîine sub toate aceste aspecte. Propun să se exprime acest lucru astfel, înôit să se spună că rațiunea formează printr-un proces inconștient „invarianți ai percepțiilor” și aceștia sînt ceea ce

omul simplu numește „lucruri reale“. După părerea mea, știința procedează exact la fel, numai că pe o altă treaptă a perceperii, anume, atunci cînd utilizează toate acele aparate de măsurare care stabilesc esența observației și măsurătorilor fizice. Aici observațiile multiple sînt legate tot prin cîteva trăsături imuabile — invariații, care, cu toate că se deosebesc de trăsăturile percepțiilor obișnuite, nu sînt totuși în mai mică măsură indicatori de aceeași natură pentru lucruri, obiecte și particule. Căci, chiar pentru descrierea a ceea ce vedem cu instrumentele cele mai fine, nu ne stă la dispoziție decît limbajul uzual. Astfel, cu toate că obiectele atomice nu au toate proprietățile obiectelor obișnuite, ele au totuși destule proprietăți bine determinate, pentru a ne permite să le atribuim realitate în aceeași măsură ca și unui cîine. Faptul că observații cu totul diferite asupra electronului dau mereu aceleași valori pentru sarcină, masă de repaus și spin, cred că ne îndreptățește suficient să vorbim despre electroni ca despre particule reale.

Dacă am recunoscut în acest fel o realitate indiscutabilă particulelor, care este atunci situația în ce privește undele? Sînt ele de asemenea reale, și anume în ce sens? S-a spus că electronii apar cîteodată ca unde și cîteodată ca particule. Poate că ele își schimbă caracterul în fiecare duminică și în fiecare miercuri, așa cum a afirmat o dată, în zeflema, un mare experimentator, evident, într-o izbucnire de supărare din cauza capriciilor unor teoreticieni. Eu nu pot să aprob un asemenea punct de vedere. Pentru a descrie o situație fizică, avem nevoie atît de unde, cît și de descriu o „împrejurare“ — adică o întreagă situație experimentală —, cît și de particule, care sînt obiectele propriu-zise ale cercetării din domeniul atomilor. Pătratul unei funcții de undă, care reprezintă o densitate de probabilitate, are caracter de realitate. Căci, nu se poate nega că probabilitatea are un anumit grad de realitate. Cum ar putea fi aplicată altfel la lumea reală o previziune întemeiată pe calculul probabilităților? Eu nu am o părere prea favorabilă despre numeroasele încercări de a face cumva inteligibilă această chestiune. Mi se pare că este vorba, exact ca în cazul conceptului de necesitate din relațiile cauzale ale fizicii clasice, despre ceva ce se află

dincolo de fizică, despre o idee metafizică. Același lucru este valabil în ce privește interpretarea statistică a funcțiilor de undă ale mecanicii cuantice. Utilizarea particulelor și undelor în fizică ar putea fi denumită o „dualitate” în descriere, dar ea trebuie distinsă cu strictețe de principiul complementarității.

Permiteți-mi, în încheiere, să pun întrebarea, dacă aceste noi dezvoltări din fizică nu au cumva vreo influență oarecare asupra altor domenii ale gândirii, înainte de toate, asupra marilor probleme metafizice. Aici apare în primul rînd disputa veșnică dintre idealism și realism din filozofie. Nu cred ca noile puncte de vedere din fizică să poată furniza vreun argument important unei părți sau celeilalte. Cel care crede că singura realitate importantă este imperiul ideii, al spiritualului, n-ar trebui să se ocupe cu științele naturii. Omul de știință trebuie să fie realist. El trebuie să vadă în impresiile sale senzoriale mai mult decît niște halucinații, adică trebuie să vadă în ele mesaje din partea unei lumi exterioare reale. Pentru descifrarea acestor mesaje el utilizează idei de o natură foarte abstractă — teoria grupurilor în spații cu multe și chiar cu o infinitate de dimensiuni și altele de acest fel — dar la urma urmelor el trebuie să reprezinte totuși invarianții săi de observație, lucrurile reale, cu care el învață să umble, așa cum orice meseriaș învață să manipuleze lemnul sau metalul. Teoriile moderne au mărit și au rafinat imperiul ideilor, dar nu au schimbat cu nimic situația în ansamblul ei.

O adevărată îmbogățire a gândirii noastre o constituie însă ideea complementarității. Faptul că într-o știință exactă, cum este fizica, există cazuri care se exclud și se întregesc reciproc și nu pot fi descrise cu ajutorul aceluiași noțiuni, ci pretind două feluri de modalități de exprimare, trebuie să aibă o influență — și cred că o influență binevenită — asupra altor domenii ale activității și gândirii omenești. Și aici, calea a indicat-o de asemenea Niels Bohr. În biologie, însuși conceptul de viață conduce de la bun început la o alternativă complementară: analiza fizico-chimică a unui organism viu nu este compatibilă cu funcționarea sa liberă — aplicată — și duce, *in extremis*, la moarte. În filozofie există o alternativă asemănătoare

în problema centrală a libertății voinței. Orice decizie poate fi privită, pe de o parte, ca un proces spontan care se petrece în conștiință, dar pe de altă parte, ca un rezultat al unor motive care au fost zămislite în trecut sau în prezent prin contactul cu lumea exterioară. Dacă considerăm acest caz ca un exemplu de complementaritate, atunci pare că eternul conflict dintre libertate și necesitate se dovedește o eroare de domeniul teoriei cunoașterii. Nu pot să trec însă la o explicare a acestor chestiuni, care de-abia acum încep să fie văzute în acest fel.

Permiteți-mi să închei cu o observație la definiția dată de Russell metafizicii, de la care am pornit că ea este o încercare de a înțelege lumea ca un întreg cu ajutorul gândirii. Are oare lecția de teoria cunoașterii, pe care ne-a servit-o fizica, vreo influență asupra acestei probleme? După părerea mea, da, întrucât ea arată că descrierea totalității unui sistem într-o singură imagine este imposibilă chiar și într-un domeniu limitat. Există imagini complementare, care nu pot fi aplicate în același timp, dar cu toate acestea, nu se contrazic, și epuizează întregul numai împreună. Aceasta este desigur o învățătură foarte salutară, care, aplicată în mod just, poate să facă superflue multe dispute înfierbântate nu numai în filozofie, ci de asemenea în toate domeniile vieții.

Expunerea, care a stat la baza acestui studiu, a fost ținută cu peste șapte ani în urmă. Astăzi aș exprima altfel multe din cele de mai sus și, înainte de toate, aș evita polemica împotriva lui Albert Einstein, la care el nu mai poate răspunde.

*Situația conceptuală în fizică**

Permiteți-mi să încep cu o remarcă de ordin personal. Cu 51 de ani în urmă eram un tânăr student în științele naturii și pornisem în cel de-al doilea an universitar. Pe atunci, legea radiației, formulată de Planck, și ipoteza cuantelor împliniseră deja peste doi ani. Dar noi nu auziserăm încă nimic despre aceste cuceriri importante. Noi învățam mecanica lui Newton și aplicațiile sale, și eram inițiați în mod prudent în teoria câmpului electro-magnetic a lui Maxwell.

S-ar putea ca astăzi situația să fie aceeași. S-ar putea ca undeva în lume cineva să fi făcut o mare descoperire, despre care eu să nu fi auzit pînă acum nimic sau a cărei însemnătate eu să nu o văd. Pe măsură ce îmbătrînești, devine din ce în ce mai greu să ții pasul cu cercetarea contemporană. Ceea ce cunosc eu despre cele ce se petrec în laboratoarele și în cabinetele de studiu ale lumii este astăzi aproape la fel de neîndestulător ca în urmă cu o jumătate de secol. Ce-i drept, anii nu au trecut peste mine fără a lăsa urme. S-au acumulat o mulțime de experiențe în multe domenii, și acest lucru îmi dă curajul să vorbesc despre impresia mea în ce privește situația actuală din fizica teoretică și despre direcțiile sale de dezvoltare. O precizare a viitorului ar putea să apară temerară, căci științele naturii au fost din totdeauna pline de surprize și de rezultate experimentale neașteptate, care au produs

* 37--th Guthrie Lecture, 1953. Tradus din limba engleză după „Proc. Phys. Soc.” A, vol. LXVI (1953), p. 501 și publicat în „Physikalische Blätter”, 10 (1954), p. 193.

schimbări în construirea teoriilor. Cu toate acestea, îndrăznesc să fac anumite presupuneri pe baza unui fenomen, pe care l-aş numi „stabilitatea principiilor“. Nu presupun că ar exista în afara matematicii anumite principii, care să fie imuabile, apriorice, în sensul cel mai strict. Dar cred că există o anumită atitudine spirituală generală, care se schimbă foarte încet şi care determină anumite perioade filozofice cu idei caracteristice în toate ramurile activităţii umane, inclusiv în ştiinţele naturii. Pauli a folosit în ultimul timp, într-o scrisoare pe care mi-a adresat-o, expresia de „stil“, de stil de gândire, de stil nu numai în artă, ci şi în ştiinţele naturii. Eu preiau acest concept şi afirm că teoria fizică posedă un stil al său şi că din această stare de fapt decurge un fel de stabilitate a principiilor sale. Ele sînt, ca să spunem aşa, *relativ apriori*, referitoare la perioada respectivă de timp. Cel care este conştient de stilul epocii sale, acela poate să facă unele previziuni prudente. Pot fi respinse cel puţin acele idei care sînt străine de stilul epocii proprii.

Eu nu vreau să arunc aici o privire istorică de ansamblu asupra fizicii, din acest punct de vedere, nici să examinez chestiunea dacă stilul ştiinţelor naturii, în special cel al fizicii, mai depinde şi de alte condiţii, ca de pildă, de cele economice. Voi începe în mod direct cu epoca modernă, cu Galilei şi cu Newton, şi voi scoate în evidenţă, cu acest prilej, numai un singur punct caracteristic, şi anume separaţia dintre subiect şi obiect în descrierea fenomenelor naturii. Pentru filozofii greci, cauza mişcării era de nedespărţit de forţa unei fiinţe vii — om sau dumnezeu — care provoacă mişcarea, care resimte efortul. Mai mult, ei utilizează ideea de perfecţiune ca principiu explicativ. După părerea lor, planetele se mişcau pe orbite circulare sau suprapuneri de orbite circulare (epicicluri), deoarece cercul este curba cea mai perfectă. Perfecţiunea domnea în sferele cereşti, dezordinea pe planul pămîntesc, legea şi ordinea printre stele, haosul şi lupta pe pămînt. Epoca creştină a adus idei noi şi a fost cu siguranţă o epocă cu un stil propriu ; iar în ce priveşte ştiinţele naturii, ea a apelat la cei vechi, şi a păstrat punctul de vedere antropocentric şi subiectiv. Ideea perfecţiunii a fost acum întruchipată în dumnezeu. Fenomenele naturii

se petreceau spre slava sa, spre pedepsirea celui ce păcătuia și spre recompensarea celui bun. Acest motiv își găsește încă o puternică expresie la Kepler.

Schimbarea a început cu Galilei și Newton. Ei au introdus descrierea și explicarea obiectivă, fără idei preconcepute, caracteristică pentru epoca nouă. Dar stilul vechi n-a dispărut imediat. Urmele sale s-au mai arătat încă mult timp, de pildă în cazul interpretării metafizice a principiului de minim al mecanicii. Maupertuis era ferm convins de faptul că acțiunea minimă ar exprima o intenție a naturii sau a creatorului. Chiar lucrarea lui Euler, în care e dată prima formulare strictă a principiului acțiunii minime, nu e liberă de această atitudine spirituală metafizică. De-abia în lucrările lui Lagrange a dispărut ea, în sfârșit.

De aici încolo, lumea e considerată un mecanism stăpînit de legi strict deterministe. În cazul în care este dată o stare inițială, întregul curs viitor al evenimentelor poate fi prezis cu ajutorul ecuațiilor diferențiale ale mecanicii. Principiile de minim, după cum spunea Mach, nu își aveau originea în economia naturii, ci în economia de gîndire a omului ; integrala de acțiune reduce un sistem de ecuații integrale la o singură expresie simplă.

Premisa care permite această concluzie este că lumea exterioară, obiectul științelor naturii, și noi, subiectul care observă, măsoară și calculează, sîntem pe deplin separați, că există o cale de a obține cunoașterea unui fenomen fără a intra în interacțiune cu el.

Cu această filozofie a naturii am fost noi crescuți de către generația mai veche. Ea poate fi denumită stilul *newtonian*, deoarece mecanica cerească *newtoniană* i-a servit ca model. Ea s-a dovedit deosebit de eficace și în cazul treburilor pămîntești, chiar și atunci cînd a fost transpusă de la mecanica sistemelor materiale la fenomenele electrodinamice din vid și din materie. Teoria lui Maxwell consideră polaritatea dintre subiect și obiect ca dovedită, și este strict deterministă.

O nouă epocă, un nou stil își are începutul în anul 1900, atunci cînd Planck a publicat formula sa a radiației și ideea cuantei de energie. Apariția sa a fost pregătită printr-o dezvoltare îndelungată, în cursul căreia s-a dez-

văluit insuficiența mecanicii clasice pentru studiul comportării materiei. Ecuațiile diferențiale ale mecanicii nu determină ele singure nici o mișcare definită, ci necesită stabilirea unor condiții inițiale. Ele explică, de exemplu, orbitele eliptice ale planetelor, dar nu și de ce există tocmai aceste orbite și nu altele, cu toate că există în cazul lor anumite regularități: binecunoscuta regulă a lui Bode. Aceasta e considerată ca o chestiune ținând de preistoria sistemului, ca o problemă de cosmologie și pe deasupra, discutabilă și ea în cel mai înalt grad. În domeniul atomisticii, insuficiența ecuațiilor diferențiale este chiar încă mai bătătoare la ochi. Teoria cinetică a gazelor a fost primul exemplu care a arătat în mod clar necesitatea unor ipoteze noi, referitoare la distribuția atomilor într-un moment dat. Iar aceste ipoteze noi s-au dovedit mai importante chiar decât ecuațiile mișcării. Traiectoriile reale ale particulelor nu joacă absolut nici un rol, ci numai energia totală, care determină valoarea medie observabilă. Deplasările mecanice sînt reversibile; de aceea, pentru explicarea proceselor fizice și chimice ireversibile e nevoie de ipoteze noi, cu caracter statistic. Mecanica statistică a netezit calea pentru noua teorie a cuantelor.

O dată cu cuanta de acțiune a rezultat o nouă poziție față de polaritatea dintre subiect și obiect. Ea nu este nici în întregime subiectivă, ca doctrinele antice sau medievale, nici pe deplin obiectivă ca filozofia postnewtoniană.

Schimbarea punctului de vedere a fost determinată de zdruncinarea tuturor încercărilor de a înțelege fenomenele atomice de pe poziția mecanicii uzuale. Trebuia să se găsească o nouă mecanică, mecanica atomică, și am ajuns la ea pas cu pas. Pasul cel mai important a fost ideea lui Bohr a stărilor staționare și a trecerilor dintre ele. Stările sînt anumite traectorii mecanice, care sînt alese cu ajutorul unor reguli cuantice simple; energia cîștigată sau pierdută la trecere este legată cu frecvența de emisiune sau de absorbție prin legea lui Planck: $E = h\nu$. Succesul surprinzător al acestei teorii la explicarea stabilității atomului, a structurii spectrelor atomice și moleculare, a sistemului periodic al elementelor și a multor alte proprietăți ale materiei nu l-au condus pe Bohr la convingerea că aceasta ar fi chiar soluția finală. El a subliniat de la

bun început noile trăsături ale modelului, și anume, caracterul indeterminist al trecerilor și apariția întâmplării în cursul proceselor elementare. Aceasta înseamnă sfârșitul separării marcate dintre obiectul observat și subiectul observator. Căci întâmplarea poate fi înțeleasă numai în legătură cu așteptările unui subiect.

După o luptă de 25 de ani, din diferite izvoare s-a constituit o teorie satisfăcătoare. Așa-numita mecanică matriceală a lui Heisenberg a dat ideilor lui Bohr o formă de exprimare logic ireproșabilă. O cu totul altă cale, independentă de aceasta, a găsit *De Broglie*. Ideile sale au fost dezvoltate mai departe în mecanica ondulatorie a lui Schrödinger. Dirac a dat teoriei o altă formă și a obținut cu această ocazie un sistem de mare frumusețe și perfecțiune, care e totuși destul de abstract. Teoria a mai căpătat apoi încă o completare, sub forma unei teorii a procesului de măsurare, în conformitate cu Heisenberg și Bohr, care face legătura între formalism și realitatea experimentală.

Trăsătura sa esențială constă în faptul că mărimile fizice sau, în limba lui Dirac, „observabilele“, cum ar fi coordonatele, impulsurile, energia particulelor, componentele intensității câmpului ș.a.m.d., nu pot fi reprezentate prin variabile, ci prin simboluri cu o regulă de multiplicare necomutativă sau — exprimat în mod mai concret — prin operatori A , care acționează asupra unei mărimi ψ , prin faptul că o transformă pe aceasta într-o altă mărime $A\psi$. Această funcție ψ este o generalizare a amplitudinii ondulatorii a lui De Broglie și Schrödinger, și determină starea sistemului. Ea satisface o ecuație de tip determinist, așa cum e uzual în teoria clasică. Cu toate acestea, ea nu permite nici o precizare determinată asupra observabilelor, ci numai una statistică: $|\psi|^2$ — este probabilitatea stării reprezentate prin ψ , iar valoarea previzibilă a unei observabile A , în această stare, poate fi exprimată prin ψ . În particular, rezultă că incertitudinea δq a unei măsurări a coordonatei q (determinat exact prin valoarea previzibilă a abaterii medii pătrate) și incertitudinea δp a impulsului corespunzător p satisfac relația de nedeterminare a lui Heisenberg $\delta q \delta p > h/4\pi$, în care h este constanta lui Planck. Relații asemănătoare sînt valabile și pentru alte perechi de așa-numite variabile conjugate.

În această formulare abstractă apar cuvintele particulă, coordonată, impuls ș.a.m.d., dar în mod evident cu o semnificație, care se abate de la modul cum sînt folosite în limba obișnuită. Se admite, cu privire la o particulă de praf, faptul că la un moment dat ocupă un anumit loc și posedă o anumită viteză. Un electron sau oricare altă particulă care ascultă de legile mecanicii cuantice se comportă altfel. În conformitate cu legea de nedeterminare, o anumită poziție (δq foarte mic) cere un δp mare ($> h/4\pi\delta q$) și, o dată cu aceasta, o mare nedeterminare a vitezei. Această chestiune a fost luată atît de des în discuție, încît nu e nevoie să mă opresc asupra ei. Dezvoltarea mecanicii cuantice a mai descoperit și alte trăsături ale modului curios de comportare, ca de pildă lipsa de individualitate a particulelor, care atrage după sine consecințe cu totul nemijlocite și decisive pentru termodinamica statistică.

În legătură cu aceasta, se ridică întrebarea, cum ne putem descurca cu aceste noi concepte de particule și cu proprietățile lor, fără a ajunge în conflict cu acel fapt evident că instrumentele utilizate în experimentări și în cursul observațiilor sînt corpuri normale, care ascultă de legile lui Newton. De această problemă se ocupă teoria lui Bohr a măsurării. Dacă lăsăm la o parte toate subtilitățile matematicii, atunci punctul esențial al mecanicii cuantice îl constituie legile lui Planck și ale lui Einstein — De Broglie, și anume: $E = h \nu$ și $p = h \kappa$; aici E și p reprezentînd energia și impulsul particulelor iar ν și κ frecvența și numărul de unde al undelor „corespunzătoare”. Cel care încearcă reprezentarea semnificației acestei corespondențe în spațiu și timp va ajunge într-o situație paradoxală. Căci E și p se referă la o particulă fără dimensiuni, pe cînd ν și κ , la o undă armonică; prin definiție, aceasta din urmă este extinsă la infinit în spațiu și timp. De aceea, soluția contradicției trebuie să fie găsită prin analizarea folosirii conceptelor de loc și durată în conexiune cu acela al trenului de unde.

Sîntem obișnuiți să utilizăm ideea unui interval finit de timp sau a unei durate finite în cazul unor întîmplări oarecare, de toate zilele (eventual, în cazul căderii unei pietre din mîna mea pe pămînt). Cu toate acestea, există cazuri aparent simple, la care această accepție nu este

justificată. Propoziția „un ton muzical durează un timp anumit” nu are nici o însemnătate riguroasă. Aceasta nu este nici pe departe o constatare pur logică, ci o realitate. Într-adevăr, un stacato alert sună prost la tuburile de sonoritate profundă ale unei orgi. Căci un tren de unde, care, cu toate că se aseamănă cu o undă armonică, dar începe la un anumit moment dat și este întrerupt după o anumită durată, care nu este mare în comparație cu perioada de oscilație, nu este în realitate o undă armonică, ci o suprapunere de unde armonice cu frecvențe distincte, un pachet de unde : exprimat în termeni acustici, un zgomot. Această stare de fapte este de asemenea cunoscută din optică, unde ea constituie fundamentul teoriei puterii separatoare a instrumentelor, și a devenit în ultimul timp de cea mai mare importanță în teoria informației (retransmisia prin unde electromagnetice sau prin alt fel de unde).

Un raționament elementar ne conduce la următoarele relații care limitează valorile posibile ale lui δt și δv , precum și a lui δx și $\delta \kappa$:

$$\delta t \delta v > 1; \delta x \delta \kappa > 1$$

Acestea sînt soluțiile regulilor de nedeterminare ale lui Heisenberg ; dacă se multiplică cu h și se întrebuintează ecuațiile Planck-De Broglie, se obține :

$$\delta t \delta E > h; \delta x \delta p > h.$$

Această judecată nu înlătură de loc paradoxurile cu caracter aproape irațional ale corespondenței Planck-De Broglie. Ea ajută însă la constatarea, pe această cale, a faptului că nu pot exista contradicții între rezultatele măsurătorilor.

Locul și durata se pot măsura numai cu ajutorul scărilor rigide și al ceasurilor, iar energia și impulsul, numai cu ajutorul unor componente mobile, care se supun legilor de conservare. Astfel, nedeterminarea reciprocă se bazează pe posibilitatea a două feluri de experimente, care se exclud reciproc sau care sînt complementare. Bohr a lămurit această „complementaritate” prin multe exemple sugesive. El răspunde cu unele din aceste exemple la atacurile lui Einstein, care spera să refuze regulile de nedetermi-

nare cu ajutorul unor instalații experimentale ingenioase. Eu cred că încercările de a ataca legea nedeterminării vor înceta cu timpul. Rezultatul durabil al strădaniilor lui Bohr este aprecierea simplă dată mai sus, care arată cu o logică imperioasă că legile Planck-De Broglie au, ca urmare, cu necesitate dualitatea corpuscul-undă și proprietatea complementară a dispozitivelor destinate măsurării perechilor de mărimi conjugate, cum ar fi energia și timpul, impulsul și locul.

Strîns legată de această dualitate este polaritatea subiect-obiect. Căci, atunci cînd un experiment trebuie să fie planificat într-un anumit fel, spre a cerceta o componentă sau alta a unei perechi de mărimi conjugate, este imposibil să obții o informație cu privire la sistemul în sine, luat în considerație; observatorul trebuie să se decidă dinainte ce gen de răspuns dorește el să aibă. În acest fel, deciziile cu caracter subiectiv se amestecă în mod inseparabil cu observațiile obiective. Același lucru rezultă din descrierea matematică cu ajutorul funcției de stare, care e determinată numai de către întregul sistem, inclusiv mijloacele de observație dependente de subiect.

Aceasta este o schiță a stilului modern al fizicii, care a fost acceptată practic de toți fizicienii, atît de către experimenatori cît și de către teoreticieni. Ea corespunde în totul cu datele electronicii, spectroscopiei, radioactivității, fizicii nucleare și chiar ale chimiei și astrofizicii. Întrebările la care teoria are răspunsuri gata pregătite sînt tocmai acelea la care experimentatorul ar dori să obțină răspuns. Pentru el, traiectoriile electronilor în atomi, căile atomilor în gaze și traiectoriile nucleonilor în nuclee sînt pe deplin indiferente; el este cu desăvîrșire mulțumit de cunoașterea stărilor staționare și a secțiunilor efective în cazul ciocnirilor, pe care i le furnizează teoria.

Eu cred că acest gen al gîndirii științifice este în concordanță și cu trăsătura fundamentală generală a filozofiei contemporane. Noi am pierdut credința în posibilitatea de a separa cunoașterea de decizia noastră; noi sîntem conștienți că sîntem, în fiecare moment dat, atît cel ce observă cît și cel care acționează în drama vieții. Bohr însuși a preconizat extinderea generală a ideii sale cu privire la complementaritate la domeniile biologiei și fiziolo-

giei. Probleme vechi, cum sînt cele relative la corelația dintre spirit și materie, dintre libertate și necesitate, apar astfel într-o lumină nouă. Eu nu mă pot opri aici mai amănunțit la aceste întrebări profunde, dar aș vrea să mă refer la cărțile pline de farmec ale lui Weizsäcker [1], în care ele sînt în amănunt și cu pricepere tratate.

Îndrăznesc să fac profecția că acest stil de gîndire va persista, și că o viitoare schimbare, în măsura în care va trebui să vină, nu va readuce stilul din trecut, așa-numit clasic, ci ne va îndrepta spre ceva care se află încă mai departe. Încrederea mea în această prezicere se bazează nu numai pe succesele teoriei actuale, ci și pe înclinația mea personală spre filozofia sa.

Numai că în momentul de față, acest punct de vedere este atacat în mod impetuos tocmai de cîțiva dintre acei cercetători care au contribuit cel mai mult la dezvoltarea teoriei cuantelor. Însuși Planck era sceptic. De pildă, atunci cînd, ca președinte al Academiei berlineze, l-a prezentat pe Schrödinger (acesta i-a fost urmașul la catedra sa de la universitate), l-a apreciat ca pe omul care a reabilitat determinismul prin ecuația sa a undelor. Einstein, care a reînnoit în optică ideea corpusculilor, care a introdus probabilitățile de trecere dintre două stări staționare, și este răspunzător și în ce privește alte abateri anticlasice, s-a îndreptat împotriva interpretării statistice a mecanicii cuantice într-un mod de-a dreptul pătimaș. Am amintit deja încercarea sa de a combate relația de nedeterminare prin idei pline de spirit, precum și respingerea acestor atacuri de către Bohr. Atunci cînd Einstein n-a reușit să susțină afirmația că ar exista lacune logice în mecanica cuantică, a declarat că ea este o descriere „incompletă” a naturii. Eu am mai folosit o dată aceeași expresie în cele de mai sus, în legătură cu ecuațiile diferențiale ale mecanicii clasice, care, neavînd valori inițiale și de frontieră, pentru care în teoria clasică nu există nici o lege, sînt imperfecte. După părerea mea, prejudecata deterministă duce chiar și în teoria clasică, la consecințe stranii. Să ne imaginăm N particule în locuri bine determinate într-o repartiție neregulată, precum și o altă particulă care, fiind proiectată în această grămadă, se ciocnește în conformitate cu legile clasice și este aruncată

înapoi. Evident, în cazul că N este mare, la cea mai neînsemnată schimbare a mișcării inițiale nu se produce o schimbare oarecum mică a stării finale, ci o enormă varietate de efecte mari. Dacă, pe deasupra, toate particulele se mai află în mișcare, ca moleculele de gaz, atunci toate acestea se vor petrece într-o măsură mai intensă. În consecință, determinismul presupus este pur și simplu o iluzie.

Oamenii admirabili din acest grup, la care mai trebuie adăugat și Von Laue, pot fi numiți adversari filozofici sau încă, spre a folosi o expresie mai puțin respectuoasă și mai directă, cei nemulțumiți.

Mai există apoi cei care recunosc consecințele de neînlăturat ale relațiilor Planck-DeBroglie, $E = h\nu$ și $p = h\kappa$, dar totuși le sacrifică și ar vrea să păstreze numai o față a tabloului. Există partizani ai particulelor și partizani ai undelor. Bineînțeles că toți sînt fizicieni teoreticieni; ei sînt numeroși printre autorii cărții apărute nu de mult, închinată lui De Broglie [2] la cea de-a 60-a aniversare a zilei sale de naștere. Insuși De Broglie, cu toate că a descoperit undele de electroni, a întreprins tentative serioase pentru salvarea determinismului, prin faptul că a introdus un parametru ascuns. Una dintre propunerile sale [3] a fost de a adăuga o funcție complexă în forma

$$\Psi = R \exp(i\Phi);$$

atunci, ecuația de undă a lui Schrödinger este echivalentă cu un sistem de ecuații de mișcare clasice pentru particule sub influența a două forțe. Una dintre ele posedă potențialul Φ , cealaltă potențialul complementar U . Ultima depinde de R și este supusă unor oscilații puternice, în conformitate cu interacțiunea particulelor, prin care e provocat același efect, ca nedeterminarea în interpretarea uzuală. O propunere asemănătoare a fost făcută încă în anul 1927 de către Madelung. De curînd, considerații de acest fel au fost reactualizate de către Frenkel și Blohințev în Rusia, precum și de către Bohm în America [4]. Încă în anul 1932 Von Neumann [5] a arătat că este imposibil să introduci un parametru ascuns, fără a ajunge în conflict cu rezultate consolidate ale teoriei tradiționale. Din această cauză se străduiește Bohm să arate că, în limitele

cunoștințelor actuale, nu este posibilă determinarea experimentală a parametrului său ascuns ; el speră că descoperirile viitoare vor face ca acest lucru să fie posibil. Dar Pauli a arătat, în volumul „De Broglie” amintit, că acest procedeu duce la contradicții. Căci încă în cazul unor probleme ale termodinamicii statistice, parametrii ascunși au trebuit să-și facă cunoscută existența și să provoace abateri de la repartiția Bose sau Fermi-Dirac. Cu aceasta, mișcarea reacționară a partizanilor *particulelor* poate fi considerată ca lichidată.

Schrödinger a ocupat chiar de la început poziția adversă : întreaga fizică e teorie ondulatorie, nu există nici un fel de particule, nici un fel de stări staționare, nici un fel de treceri, există numai unde. Am amintit deja că Planck a salutat aceste idei, dar majoritatea fizicienilor s-au folosit în continuare de imaginea particulelor și vorbeau despre atomi, electroni, nuclee, mezoni ș.a.m.d.

De curînd, Schrödinger a reluat campania sa de purificare (1952). El pledează cu pasiune nu numai pentru îndepărtarea din fizică a particulelor, ci și a stărilor staționare, a trecerilor ș.a.m.d. Motivul care l-a condus la descoperirea mecanicii ondulatorii a fost repulsia sa puternică împotriva „salturilor cuantice” ale lui Bohr. Putem înțelege triumful său, atunci cînd a reușit să tălmăcească toate aceste „absurdități” ca fenomene de rezonanță binecunoscute și lipsite de importanță.

Eu însumi aș putea aduce argumente asemănătoare pentru a declara matricele ca singurele mijloace de descriere utilizabile. Atunci cînd Heisenberg a publicat lucrarea sa fundamentală, în care a purificat teoria cuantelor de rămășițele clasice și a formulat-o cu ajutorul amplitudinilor de trecere, el era asistentul meu strălucit, dar încă foarte tînăr și cu nu prea multă experiență. În realitate, el nu cunoștea cu exactitate ce este o matrice, și atunci cînd s-a împotmolit, m-a rugat să-l ajut. După un oarecare efort, am găsit legătura cu calculul matriceal, și-mi amintesc de surprinderea mea, atunci cînd condiția cuantică a lui Heisenberg s-a dovedit a fi ecuația matriceală

$$qp - pq = i\hbar/2\pi.$$

Varianta matriceală a mecanicii cuantice a fost apoi concepută de mine în colaborare cu elevul meu Jordan [6].

Totuși, nu am nici o predilecție, și nici nu am avut-o vreodată, pentru metoda matriceală. Atunci cînd a apărut mecanica ondulatorie a lui Schrödinger, am simțit imediat că ea cere o interpretare care să nu fie deterministă. Am presupus că $|\psi|^2$ este densitatea de probabilitate; dar a trebuit să treacă cîtva timp pînă am găsit argumente fizice în favoarea acestei ipoteze, și anume, fenomene de ciocnire și treceri sub influența unor forțe exterioare. Și atunci s-a întîmplat, în mod ciudat, ca Heisenberg, în primul rînd, să fie de altă părere și să mă acuze de trădare față de spiritul mecanicii matriceale. Dar, în curînd a trecut peste acest moment și a realizat minunata împăcare dintre particule și unde cu ajutorul relației sale de nedeterminare.

Dar acum trebuie să revin încă o dată la atacul lui Schrödinger împotriva particulelor și cuantelor. Această poziție nu poate fi considerată pur și simplu ca falsă, căci funcția ψ , care într-un spațiu multidimensional poate fi reprezentată ca undă, conține într-adevăr toate informațiile fizicii, presupunînd că se cunoaște modul în care poate fi restabilită legătura cu experiența. Și tocmai în aceasta constă dificultatea. Noi nu putem descrie altfel ceea ce facem și vedem în cursul experimentării decît cu ajutorul corpurilor și al mișcării acestora. Schrödinger, însuși nu poate evita limbajul particulelor, chiar dacă încearcă să demonstreze întîietatea limbajului undelor. Eu m-am lămurit în mod amănunțit în această chestiune într-un alt loc [7] și nu mai am nevoie să mă repet aici. Cred că propunerea lui Schrödinger este nerealizabilă și că este împotriva spiritului vremii.

Nu aș vrea însă ca acum să rămîneți cu impresia că, după părerea mea, interpretarea actuală a teoriei cuantelor ar fi definitivă. Cred numai că o revenire la determinismul *newtonian* este imposibilă.

Expunerea mea de pînă aici m-a condus atît de departe, încît acum sînt dator să mă țin de promisiunea de a încerca unele preziceri în ce privește viitorul.

Problemele fundamentale ale fizicii contemporane se referă la particulele elementare și la cîmpuri, mai cu seamă la stabilirea și instabilitatea particulelor, la explicarea maselor, a spinilor, a interacțiunilor ș.a.m.d. Acesta este un program cuprinzător, care îmbrățișează întreaga fizică nu-

cleară și studiul radiațiilor cosmice, ceea ce duce în mod hotărât dincolo de cadrul mecanicii cuantice de pînă acum, căci problema maselor elementare este legată de problema dificilă a energiei proprii a particulelor. Este binecunoscut că energia proprie a unui electron este infinită, încă în teoria clasică a lui Maxwell-Lorentz. În teoria cuantelor, în afară de această singularitate de forma e^2/r (unde e este sarcina, iar r — raza, și se consideră limită cînd $r \rightarrow 0$), mai apar încă o serie de alte integrale divergente. Eu am urmărit doar de departe aceste cercetări, dar am impresia că prin lucrările care au fost începute de Tomonaga și de Schwinger [8], a fost găsit un gen de rezolvare: cu ajutorul unei metode matematice ingenioase, denumită „renormare”, singularitățile proprii pot fi separate, iar atunci cînd formulele conduc la expresii divergente, acestea pot fi ocolite pe o cale determinată în mod univoc de către cererea invariației relativiste; ecuațiile care rămîn în plus furnizează rezultate finite precise. Cu privire la această teorie, Dirac scrie: „ea este urîtă și incompletă și nu poate fi considerată ca o rezolvare satisfăcătoare a problemei electronilor”; el propune o altă teorie [9]. Eu consider că prima parte a sentinței sale este prea tare, căci este o mare realizare chiar numai faptul de a poseda un formalism eficient, care conduce, dacă e mînuit cu pricepere, la explicarea unor efecte atît de fine ca deplasarea Lamb-Rutherford a nivelurilor atomului de hidrogen [10], abaterea de la factorii magnetici ai lui Landé ș.a.m.d. Dar eu împărtășesc punctul de vedere după care această teorie e imperfectă și ocolește problema reală, în loc să o abordeze. Dirac a propus o teorie cu totul deosebită, la baza căreia stă ideea că apariția sarcinii, sub forma unor porțiuni finite, electronii, trebuie să fie un efect cuantic; de aceea, teoria clasică corespunzătoare trebuie să fie pur ondulatorie. Printr-o modificare ușoară a ecuațiilor tradiționale, el a obținut o asemenea teorie ondulatorie, dar pînă acum nu a reușit să o cuantifice. Este prea posibil ca o teorie satisfăcătoare a cîmpului electromagnetic și a sarcinilor sale să nu poată fi de loc stabilită, deoarece fotonii și electronii nu pot fi tratați fără a avea în vedere și alte particule.

Trăsătura cea mai remarcabilă a fizicii moderne este descoperirea permanentă a tot mai multe particule instabile, denumite mezonii. În scopuri practice, pentru fiecare tip de particule s-au stabilit ecuații de unde liniare cu termeni neliniari, care descriu interacțiunea. Este limpede că aceasta este o încercare provizorie, care va trebui să fie înlocuită într-o zi printr-o teorie cuprinzătoare a materiei, în care diferite mase de particule să apară ca valori proprii ale operatorilor sau ca rezolvări ale unor ecuații. Astăzi, este în general admis că această teorie va cuprinde o lungime absolută a sau un impuls absolut $b = h/2\pi a$, și că în domeniul mărimilor de ordinul lui a , geometria poate deveni lipsită de sens. O încercare remarcabilă de a formula o asemenea situație îi aparține lui *Yukawa* [11]; el consideră o componentă a câmpului φ nu ca o funcție de coordonate spațiale x, y, z și timpul t , ci atât pe φ , cât și pe x, y, z, t , ca mărimi necomutative, și postulează anumite reguli de comutare între ele, care reprezintă generalizări ale ecuațiilor diferențiale obișnuite și trec în acestea atunci când toate distanțele sînt mari, în comparație cu lungimea absolută a . *Yukawa*, *Möller*, *Rayski* și alții au arătat [12] că divergențele energiei proprii și alte dificultăți pot fi evitate pe această cale.

Primul care a văzut clar necesitatea cuprinderii laolaltă a teoriilor diferitelor particule a fost *Eddington* [13]. Dar pe vremea sa erau cunoscute de-abia doar două tipuri de particule: protonii și electronii. De aceea, prin descoperirea mezonilor, încercarea sa a devenit perimată, fără a mai vorbi de ideile sale cu totul fantastice. Din ipotezele sale fundamentale rezultă valoarea întreagă 137 pentru inversa constantei structurii fine

$$1/a = hc/2\pi e^2,$$

ceea ce concordă aproape, dar nu exact, cu ultimele observații, din care s-a dedus valoarea

$$1/a = 137,0364 \pm 0,0009$$

(*Du Mond* și *Cohen* [14]).

Nu mă pot ocupa aici de numeroasele încercări care își pun drept scop cuprinderea laolaltă a diverselor câmpuri. Dar cele mai multe dintre ele pot fi reduse la schema următoare:

ecuația undelor

$$(\square + m^2) \Psi = 0$$

(unde $\square$ este operatorul lui D'Alembert) este înlocuită prin

$$F(\square) \Psi = 0,$$

unde

$$F(\xi) = (\xi - \xi_1)(\xi - \xi_2) \dots (\xi - \xi_n)$$

reprezintă un polinom de gradul n . El descrie mișcarea a n particule independente, cu masa :

$$m_1 = \sqrt{\xi_1}; \quad m_2 = \sqrt{\xi_2}; \quad \dots \quad m_n = \sqrt{\xi_n}.$$

Dacă în locul lui $\square$ se va folosi operatorul lui Dirac, atunci se poate lua în considerație spinul. Bhabha și alții au dedus teorii de acest gen din considerațiile cu privire la particule cu un spin mai înalt [15]. Eu am propus o altă metodă de determinare a funcției $F(\xi)$, care leagă această problemă cu aceea a infinităților. Și anume, i se poate adăuga lui $F(\xi)$ un factor transcendent fără zerouri. Dacă se ia, de exemplu, operatorul diferențial $p^2 - m^2$ asupra unei variabile q , în care

$$p = (-i \hbar/2\pi) \partial/\partial q,$$

atunci factorul $\exp. (-p^2/2)$ se poate adăuga (în acest caz, $\hbar = h/2\pi a$ este luat ca unitate pentru p). De aici decurge, în primul rând, că domeniul de mărimi al impulsului va fi limitat în partea superioară, înlăturându-se astfel infinitul. Iar în al doilea rând, dînd expresiei.

$$(p^2 - m^2) \exp. (-p^2/2)$$

valoarea cuvenită, m este determinat ; pentru $m^2 = 2$, expresia reprezintă polinomul lui Hermite de gradul II în p și este în acest fel identică transformata sa Fourier. Această observație sugerează principiul general, conform căruia întreaga fizică poate fi formulată în limbajul grupurilor de transformări și al invariantilor lor. Dacă se presupune invarianța reciprocă (aceasta înseamnă invarianța față de transformarea Fourier), atunci se obține un șir de mase ca rădăcini ale polinoamelor lui Hermite, dintre care primele se află aproape de masele mezonilor π și μ . Schrödinger a arătat însă că în acest caz apar difi-

cultăți serioase în lumca spațio-temporală cu patru dimensiuni.

Cu totul independent de aceste considerații, posibilitatea eliminării infinităților cu ajutorul factorului $\exp. (-\square)$ a fost cercetată de Pais și Uhlenbeck, precum și de către alții [16].

Cea mai radicală modificare a construcției teoriei a fost propusă de Heisenberg [17]. Convins de existența unei lungimi absolute $a \sim 10^{-13}$ cm sau a unui timp absolut $\tau = a/c \sim 10^{-42}$ sec, el a pus sub semnul întrebării dacă are în genere vreun sens descrierea uzuală a unui sistem fizic cu ajutorul unei funcții Hamilton pentru intervale de spațiu și timp care sînt mai mici decît a și τ . Ceea ce putem observa în realitate sînt numai modificări în cadrul unor perioade de timp, care sînt mari în comparație cu τ . Dacă poziția sistemului la momentul dat t_1 este descrisă prin $\psi(t_1)$, cea de la momentul dat t_2 , prin $\psi(t_2)$, atunci se poate admite ca în ecuația

$$\psi(t_2) = S(t_1, t_2) \psi(t_1)$$

operatorul de trecere $S(t_1, t_2)$ are o semnificație fizică numai pentru $t_1 - t_2 > \tau$; în particular are sens valoarea $S(-\infty, \infty)$. Acest operator e denumit de obicei matricea S . De exemplu, în procesele de ciocnire observăm particulele înainte și după ciocnire, și urmărim să aflăm distribuția lor după ciocnire, dacă se cunoaște cea dinainte de ciocnire: Heisenberg susține punctul de vedere după care trebuie să renunțăm la toate încercările de a descrie procesul de ciocnire ca atare.

Cererea invarianței relativiste introduce paradoxuri ciudate în această teorie. Pentru intervalele de timp mici sînt încălcate ordinea temporală a evenimentelor și deci principiul cauzalității; astfel, de pildă, o particulă poate fi absorbită înainte de a se produce ciocnirea generatoare. Dar Heisenberg a lăsat să se înțeleagă că aceste anomalii sînt principal neobservabile, datorită structurii atomice a instrumentelor [18].

Conform cu principiul corespondenței, teoria matricei S trebuie să treacă într-o teorie *hamiltoniană* obișnuită în acele cazuri în care lungimea absolută și timpul absolut nu joacă nici un rol esențial. Heisenberg ajunge la concluzia

că, cu foarte mare probabilitate, celelalte ipoteze privitoare la interacțiuni sînt neîndestulătoare. Cu toate că acestea, duc la funcții *hamiltoniene*, care pot fi renormate în sensul descris mai sus. În realitate însă, se constată că este necesară o neliniaritate esențială. Într-o nouă lucrare, el discută din acest punct de vedere procesul unor ploi de mezonii și folosește cu această ocazie o teorie neliniară a cîmpului [19], pe care eu am dezvoltat-o și publicat-o cu circa 20 de ani în urmă, în colaborare cu Infeld [20]. Aceasta este o modificare a electrodinamicii lui Maxwell, în cazul căreia energia proprie a electronului este finită. Mie a arătat încă în anul 1912 [21] că ecuațiile cîmpului electromagnetic pot fi formal generalizate, înlocuind relațiile liniare dintre cele două perechi de vectori de cîmp $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$ și $\mathbf{D}$, $\mathbf{H}$ prin relații neliniare. Ce-i drept, el n-a dezvoltat aceste relații, așa că ideea sa s-a dovedit nefructuoasă.

Ideea, pe care am folosit-o acum aici, este un caz particular al așa-zisului principiu al imposibilității, al lui Whittaker [22]. Dacă cercetarea se lovește de o piedică care, în ciuda tuturor eforturilor, nu poate fi înlăturată atunci teoria o declară ca principial de neînvins. Exemple binecunoscute sînt primul și al doilea principiu al termodinamicii, care derivă din imposibilitatea de a construi un perpetuum mobile de speța întâi, respectiv a doua. Alte exemple sînt teoria relativității, care susține imposibilitatea unor viteze ale materiei și ale semnalelor mai mari decît viteza luminii, și relațiile de nedeterminare ale mecanicii cuantice, care interzic determinarea simultană a poziției și a vitezei, respectiv a altor perechi de mărimi asemănătoare.

În cazul cîmpului electromagnetic, energia proprie poate fi făcută finită, interzicînd vectorului electric $\mathbf{E}$ să depășească o anumită limită, cîmpul absolut. Acest lucru poate fi obținut prin imitarea teoriei relativității; acolo se înlocuiește funcția clasică a lui Lagrange (a unei particule libere)

$$L = m v^2/2 \text{ prin } L = m c^2 (1 - [1 v^2/c^2]^{1/2})$$

de unde urmează apoi $v < c$. Pe o cale asemănătoare poate fi înlocuită densitatea de acțiune a lui Lagrange, din electrodinamică, printr-o expresie care conține un radical

Astfel, se obține o energie proprie finită a sarcinii unui punct, care reprezintă nu numai masa inertă, dar și, după cum a arătat Schrödinger, masa gravitațională.

O realizare mai importantă a acestei teorii mi se pare a fi evaluarea constantei de structură fină, pe care au reușit să o obțină Heisenberg și elevii săi Euler și Kockel, și a confirmat-o Weisskopf [23]. Termenii inferiori, neliniari, ai acestei teorii sînt asemuiți în acest caz cu termenii corespunzători ai teoriei găurilor, a lui Dirac, care reprezintă o așa-numită „polarizare a vidului”. Rezultă

$$1/a = h c / 2\pi e^2 = 82,$$

ceea ce, deși încă prea mic, are totuși ordinul de mărime corect. Mi se pare că aceasta este singura încercare rezonabilă de a deduce în mod teoretic numărul $1/a = 137$.

Faptul că teoria neliniară n-a avut nici un răsunet poate fi atribuit în parte dificultății cuantificării și în parte unei obiecții ridicate de către Heitler, care la timpul său mi s-a părut convingător. El spunea că o teorie clasică a electronului, care consideră constanta lui Planck ca neglijabilă, dar acceptă că sarcina elementară este finită, este lipsită de sens, pentru că $1/a = h c / e^2 = 137$ este un număr mare.

În căutarea unei teorii neliniare a câmpului, care să constituie un caz limită pentru formalismul său matriceal S , Heisenberg a preluat acum acea metodă bazată pe rădăcina pătrată și a transpus-o pe un câmp mezonice produs de un nucleon. Dar el o utilizează pentru o problemă de cu totul alt gen, și anume, în cazul unor ploi mezonice, care sînt provocate prin procese nucleare. Aici obiecția lui Heitler nu mai este valabilă. Dacă se cercetează mai îndeaproape procesul lui Heisenberg, atunci se va vedea imediat că nu se bazează pe trecerea la limită pentru $h = 0$, ci pe $N \rightarrow \infty$, unde N este numărul cuantelor participante. De fapt, Bohr a avut în vedere de la început ambele cazuri, atunci cînd a formulat drept „principiu de corespondență” trecerea de la teoria cuantelor la cazul-limită clasic (același raționament justifică și estimăția constantei de structură fină, despre care am pomenit mai sus).

Heisenberg ia în considerație ciocnirea a doi nucleoni, între care fiecare este izvorul unuia din câmpurile mezonice care satisfac ecuații de câmp neliniare. În cazul unei

energii de ciocnire foarte înalte, numărul cuantelor mezonice devine foarte mare, ceea ce justifică utilizarea ecuației clasice de undă. Energia totală a acestei unde ψ poate fi reprezentată printr-o integrală a funcției $u(\mathbf{k})$, extinsă la toți vectorii de undă $\mathbf{k}$; dacă se împarte $u(\mathbf{k})$ la cuanta de energie $h\nu$, unde $\nu = c \cdot |\mathbf{k}|$ este frecvența undei, iar rezultatul se integrează după toți $\mathbf{k}$, se obține numărul total N al cuantelor emise. Se poate arăta, pe această cale, că într-o teorie neliniară de tipul celei descrise este posibilă producerea multiplă¹ de mezoni și poate fi estimată valoarea lui N .

În momentul de față, această idee a averselor multiple întâmpină o opoziție ascuțită, mai cu seamă din partea lui Heitler, care crede că observațiile pot fi explicate printr-o producere plurală. Experimentele sînt făcute nu cu doi nucleoni care se ciocnesc, ci cu un nucleon care nimereste un nucleu. Cu această ocazie, de obicei se dezvoltă o cascadă de nucleoni și de mezoni și ia naștere o aversă de mezoni, amestecată cu nucleoni și cu fragmente mai mari. Într-o scrisoare pe care mi-a adresat-o, Heitler se referă la rezultatele experimentale ale lui Terreaux [24], ca la o confirmare a teoriei cascadelor, și la cîteva lucrări încă nepublicate ale lui Mc Cusker. Aversele au fost produse în straturi formate din carbon și din parafină cu același număr de atomi de carbon. Așa s-a putut trage o concluzie cu privire la acțiunea atomilor de hidrogen (ciocnire proton-proton). S-a constatat că pînă la de 3×10^{10} eV, nu poate fi observată nici o producere multiplă. Acest lucru se află însă într-o contradicție flagrantă cu experimentele lui Haxel și ale colaboratorilor săi, de care am aflat în cursul corespondenței cu Heisenberg; în aceste experimente, au fost cercetate straturi din carbon și parafină de aceeași masă (cu același număr de nucleoni) cu ajutorul unor contori care au înregistrat averse formate din trei sau mai

¹ Pentru explicarea aversei observate de mezoni, care apare prin ciocnirea unui nucleon din radiația cosmică cu un nucleu, avem două posibilități: sau nucleonul care se ciocnește intră în interacțiune fie numai cu *un* nucleon de nucleu, în care caz iau naștere *mulți* mezoni într-un act elementar (producere multiplă); fie cu *mulți*, în care caz este emis de fiecare dată numai *un* mezon (producere plurală).

multe particule. S-a constatat că are loc o producere multiplă. Mai apoi, Heisenberg mi-a trimis fotografia unei averse de mezoni, care conține 16 traiectorii, dintre care nici una nu a fost produsă de o particulă grea. El consideră această fotografie ca dovada producerii multiple de mezoni, dar ar putea să fie vorba tot atât de bine despre o cascadă nucleară, în cazul căreia particulele grele sînt din întâmplare toate neutroni.

De curînd, mi-a atras atenția o lucrare a lui Vidale și Schein [25], care — în caz că rezultatele ei se vor confirma — va rezolva disputa. Cu ajutorul unui balon, instrumente cu înregistrare automată au fost ridicate la o înălțime de peste 30 km; contorii au înregistrat averse în hidrogen fluid. Rezultatele par să vorbească în favoarea producerii multiple, dar ipoteza că particulele primare sînt nucleoni (protoni) este, la această înălțime, cu totul nesigură.

Am impresia că ideile temerare ale lui Heisenberg se află pe calea cea bună; această cale nu duce evident înapoi, ci înainte, spre noi abstracții, spre un nou stil de gîndire.

Am luat pînă acum în considerație numai acele probleme conceptuale care-și au originea în lumea microscopică a particulelor elementare. Dar de aceeași importanță sînt problemele macrocosmosului, care se leagă strîns cu teoria generală a relativității. Totuși, eu nu sînt un specialist în domeniul astrofizicii și al cosmologiei, așa că nu vreau să fac decît cîteva remarci cu privire la acest domeniu cuprinzător.

De pe vremea lui Eddington am aflat de existența unor legături intime între lumea atomică și univers. Însuși Einstein a întreprins fără încetare încercări pentru a înțelege existența particulelor și a cuantelor ca singularități ale unui câmp care reunește gravitația și electromagnetismul. Dar eu nu am fost în stare să cred că prin alegerea privilegiată a acestor două tipuri de câmp s-ar putea obține o unificare reală, făcînd cu totul abstracție de convingerea mea, după care teoria cuantelor nu poate fi redusă la concepte clasice.

Cea mai importantă idee din astrofizică este ipoteza unei apariții spontane a materiei. Există două versiuni ale acestei idei: una își are origina la Hoyle, Bondi și Gold

[26], care admit o creație continuă, și avînd loc regulat în spațiu, a atomilor de hidrogen ; cealaltă, la Jordan [27], care postulează apariția continuă a unor stele întregi sau chiar a unor sisteme galactice, care își fac apariția ca supernove.

Ambele teorii au comun faptul că resping ideea unei istorii a universului, așa cum a fost recomandată cu insistență prin interpretarea cea mai simplă a împrăstierii nebuloaselor (efectul Hubble), adică ideea expansiunii universului, care a început acum aproximativ 4 000 de milioane de ani, dintr-o stare de mare concentrare. În locul acestei interpretări, cele două teorii își pun amîndouă ca scop să descrie lumea ca găsindu-se într-o stare staționară, în care se naște exact atîta materie nouă cîtă dispare în infinit (adică atunci cînd este atinsă viteza luminii).

În ambele cazuri, autorii au propus o modificare a ecuațiilor de câmp ale lui Einstein. Teoria inițială a lui Hoyle nu a urmat formalismul lui Lagrange, care asigură compatibilitatea legii cauzale cu teoria generală a relativității. Astfel, ea pare, într-un mod extrem de curios, ca fiind gata să sacrifice teoria generală a relativității. Mc Crea a arătat de curînd că acest lucru nu este necesar, întrucît în cazul acceptării existenței unui gen de presiuni cosmice universale (alături de presiunea obișnuită, corespunzătoare materiei și energiei), ecuațiile relativiste pot rămîne în picioare [28].

Teoria lui Jordan se întemeiază pe o idee a lui Dirac, după care constanta gravitațională κ nu este în realitate o constantă, ci a unsprezecea variabilă a câmpului (care se modifică încetul cu încetul) și care se adaugă la cele 10 componente $g_{\tau\nu}$ ale câmpului gravitațional [29]. Această ipoteză nu este în nici un caz arbitrară, ci se sprijină pe argumente puternice, care se referă la ordinea de mărime a constantelor cosmice. Jordan a arătat, mai departe, că din punctul de vedere al teoriei grupurilor, ecuațiile sale sînt preferabile celor cu κ constant și că în mare apariția materiei, după cum propune el, nu înseamnă de loc o încălcare a legii conservării energiei ci, în ultimă instanță, o trecere a energiei gravitaționale în masă.

Ambele ipoteze sînt sprijinite de un număr considerabil de probe empirice, care constau, bineînțeles, nu într-atît

în observații directe, cît într-o măsură mult mai mare, în dezvoltarea unui tablou coerent și rațional al universului, în concordanță cu faptele. Nu sînt în stare să decid care din amîndouă se apropie mai mult de adevăr.

Am amintit aceste două idei pentru că o viitoare teorie a materiei nu poate ocoli punctul de vedere cosmologic. E foarte probabil că am neglijat să prezint aici alte propuneri importante, pentru care cer iertare.

Mă întorc la primele propoziții ale expunerii mele și îmi permit să spun că de-a lungul celor 50 de ani, care au trecut din perioada studenției mele, s-au obținut multe. Au fost rezolvate multe probleme care, la trecerea dintr-un secol în celălalt, nici măcar nu fuseseră formulate. Dar epoca actuală pare să stea în fața unor enigme noi, mai numeroase și poate mai grele. Intenția mea a fost să arăt că instrumentele noastre conceptuale vor putea să ne servească îndeajuns pentru a da de capătul lor, presupunînd că nu ne vom întoarce privirile înapoi spre timpurile frumoase de altă dată, ci înainte, spre noi aventuri ale descoperirilor și interpretărilor.

Bibliografie

- [1] C. F. Weizsäcker, *Istoria naturii*, Hirzel, Stuttgart, 1949 ; *Contribuție la imaginea despre lume a fizicii*, Hirzel, Stuttgart, 1951.
- [2] De Broglie, *Physicien et Penseur*, Michel, Paris, 1952.
- [3] Idem, C. R. Acad. Sci., Paris, **183** (1926), p. 447 ; **184** (1927) p. 273 ; **185** (1927), p. 380.
- [4] E. Mandelung, „Z. Phys“, **40** (1927), p. 322 ; J. Frenkel, în „Upshi Fisiceskih Nauk“, **42** (1950), p. 69 ; **44** (1951), p. 110 ; D. Blohințev, în „Upshi Fisiceskih Nauk“, **42** (1950), p. 76 ; **44** (1951), p. 104 ; D. Bohm, în „Phys. Rev.“, **85** (1952), pp. 166, 180.
- [5] J. v. Neumann, *Bazele matematice ale mecanicii cuantice*, Springer, Berlin, 1932, pp. 167—171.
- [6] Prima fază a mecanicii cuantice este fals citată aproape în toată literatura. Am redat cîteva exemple în cartea mea *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Clarendon Press, Oxford 1949, p. 188.

- [7] M. Born, „Brit. J. Phil. Sci.“, **14** (1953), p. 95. Vezi și studiul *Interpretarea mecanicii cuantice* din această carte, p. 170
- [8] S. Tomonaga, în „Pogr. Theor. Phys.“, **1** (1946), p. 27 ; J. Schwinger, în „Phys. Rev.“, **74** (1948), p. 1439 ; **75** (1949), p. 651 ; **76** (1949), p. 790.
- [9] P. A. M. Dirac, în „Proc. Roy. Soc.“ **A**, **209** (1951), p. 291 ; **212** (1952) p. 330.
- [10] W. E. Lamb jr, R. C. Retherford, în „Phys. Rev.“, **72** (1947), p. 241 ; **75** (1949), pp. 1235, 1332 ; **79** (1950), p. 549.
- [11] H. Yukawa, în „Phys. Rev.“, **77** (1949), p. 219.
- [12] G. Möller, K. Danske Vedensk. Selsk., Math.-Phys. Medd., **21** și **22** (1951) ; J. Rayski, în „Proc. Roy. Soc.“ **A** **206** (1951), p. 575 ; „Phil. Mag.“, **42** (1951), p. 1289.
- [13] A. Eddington, în „Proc. Roy. Soc.“ **A** **121** (1928), p. 524 ; **122** (1928), p. 358 ; ș.a. *Relativity Theor. of Protons and Electrons*, Cambridge, 1936.
- [14] J. W. Du Mond, E. R. Cohen, în „Phys. Rev.“, **82** (1951), p. 555.
- [15] H. J. Bhabha, în „Rev. Mod. Phys.“, **17** (1945), p. 260 ; **21** (1949), p. 451 ; „Phys. Rev.“, **77** (1951), p. 665 ; ș.a. Rep. of 1946 Intern. Conf. on Fundamental Particles, London, 1948.
- [16] A. Pais, G. E. Uhlenbeck, în „Phys. Rev.“, **79** (1950), p. 145.
- [17] W. Heisenberg, în „Z. Phys.“, **120** (1943), pp. 313, 673.
- [18] Idem, *Festschr. d. Akad. d. Wiss.* (Publicație festivă a Acad. de Știință) Göttingen, 1951, p. 50.
- [19] Idem, în „Z. Phys.“, **133** (1952), p. 65.
- [20] M. Born, L. Infeld, în „Nature“, **132** (1933), pp. 970, 1004 ; „Proc. Roy. Soc.“, **A** **144** (1934), p. 425.
- [21] G. Mic, în „Ann. Phys.“, **37** (1912), p. 511 ; **39** (1912), p. 1 ; **40** (1913), p. 1.
- [22] E. T. Whittaker, *From Euclid to Eddington*, Cambridge, 1949.
- [23] H. Euler, B. Kockel, în „Naturwiss.“, **23** (1935), p. 246 ; H. Euler, în „Ann. Phys.“, **26** (1936), p. 398 ; H. Euler, W. Heisenberg, în „Z. Phys.“, **98** (1936), p. 714 ; B. Kockel, în „Z. Phys.“, **107** (1937), p. 153 ; V. Weisskopf, K. Danske Vidensk. Selsk., Math.-Phys. Medd., **14** (1936), p. 6.
- [24] Ph. Terraux, în „Helv. Phys. Acta“, **24** (1951), p. 551 ; „Nuovo Cimento“, **9** (1952), p. 1029.

- [25] M. L. Vidal, M. Schein, în „Nuovo Cimento“, **8** (1951), p. 1.
- [26] F. Hoyle, H. Bondi, T. Gold, în „Mon. Not. Roy. Astron. Soc.“, **108** (1948), p. 252.
- [27] P. Jordan, în „Phys. Z.“, **45** (1944), p. 183 ; *Originea stelelor*, Stuttgart, 1947 ; „Nature“, **164** (1949), p. 637 ; *Gravitația și universul*, Braunschweig, 1952.
- [28] W. H. McCrea, în „Proc. Roy. Soc.“ **A 206** (1951), p. 562 ; „J. Trans. Victoria Inst.“, **83** (1951), p. 105.
- [29] P. A. M. Dirac, în „Nature“, **139** (1937), p. 323.

*Interpretarea mecanicii cuantice**

Expunerea care urmează este o replică la articolul publicat de Erwin Schrödinger în august și noiembrie 1952 în „The British Journal for the Philosophy of Science”, intitulat *Există salturi cuantice?* (partea I și a II-a). O discuție pe această temă a fost programată pentru reuniunea ce urma să aibă loc la 8 decembrie 1952, la „Philosophy of Science Group”, și eu am fost invitat să deschid convorbirea. Am acceptat această invitație onorabilă nu fără reticențe, deoarece mi se părea penibil să port în public o discuție într-o problemă atât de fundamentală cu unul dintre cei mai buni și mai vechi prieteni ai mei. Până la urmă, am acceptat, din următoarele motive : în primul rând, convingerea că nici o deosebire de păreri în chestiuni de fizică nu poate să zdruncine prietenia noastră ; în al doilea rând, faptul că știam că alți buni și vechi prieteni, de același rang științific ca Schrödinger, de pildă Niels Bohr, Heisenberg și Pauli, împărtășesc punctul meu de vedere ; cel de-al treilea și cel mai important motiv pentru acceptarea discuției din jurul articolului publicat de Schrödinger a fost faptul că valoarea sa literară de necontestat, largimea orizontului istoric și filozofic, precum și expunerea spirituală puteau să exercite o influență derutantă asupra acelor cititori care, fără a fi fizicieni ei înșiși, se interesează de evoluția generală a ideilor din fizică.

Discuția fixată pentru 8 decembrie nu a mai avut loc, deoarece Schrödinger a fost împiedicat să apară, fiind grav

* Traducere după „The British Journal for the Philosophy of Science”, vol. IV, 1953.

bolnav. E drept că mi-am expus introducerea pregătită și am răspuns la întrebări, dar este clar că aceasta nu însemna o soluție a disputei. De aceea, vreau să prezint aici concepția mea în formă tipărită. Ceea ce urmează este o expunere oarecum lărgită a cuvîntului meu introductiv. De aceea, nu va fi vorba în nici un caz despre toate punctele atinse de Schrödinger, ci numai despre cele ce mi se par potrivite pentru o discuție între filozofi.

I. Formularea pe scurt a concepției lui Schrödinger

Deosebirea de păreri dintre Schrödinger și mine nu se referă într-atît la o chestiune a fizicii propriu-zise, cît, într-o măsură mult mai mare, la relația dintre fizică și filozofie și cunoașterea omenească în general. Fiecare dintre fizicienii teoreticieni, firește că inclusiv Schrödinger, ar aborda o problemă fizică concretă cu aceleași metode matematice sau cel puțin cu metode echivalente, și dacă acestea conduc la țel, previziunea teoretică și prescripțiile pentru confirmarea sa experimentală ar fi practic întotdeauna aceleași. Deosebirile de păreri își fac apariția de-abia atunci cînd vine un filozof și pune întrebarea: „Ce înseamnă de fapt cuvintele tale? Cum o scoți la capăt, dacă vorbești despre electroni uneori ca despre particule, alteori ca despre unde?” și multe altele de acest fel. Asemenea întrebări, care se referă la semnificația reală a cuvintelor noastre, sînt tot atît de importante ca formalismul matematic. De acest gen sînt obiecțiile lui Schrödinger. El combate limbajul uzual în interpretarea formalismului mecanicii cuantice și propune un alt limbaj, simplu, purificat, care, după părerea sa, corespunde mai mult situației. Răspunsul meu este că modul său de exprimare este inutilizabil nu numai datorită caracterului său greoi, ci și pentru că nici din punct de vedere istoric, psihologic, epistemologic și filozofic nu poate fi justificat.

Afirmațiile lui Schrödinger pot fi înmănunchate pe scurt în cîteva fraze: Singura realitate din lumea fizică o constituie undele. Nu există nici un fel de particule și nici un fel de cuante de energie $h\nu$. Acestea sînt iluzii care se

bazează pe interpretarea falsă a fenomenelor de rezonanță ce apar în cazul interferenței undelor. Undele sînt legate de anumite numere întregi într-un mod binecunoscut din cazul oscilațiilor unei corzi și ale altor instrumente muzicale. Modalitatea în care apar aceste numere întregi i-a tentat pe fizicieni să presupună că ele ar reprezenta numărul particulelor. Există apoi o lege specială a rezonanței, caracteristică pentru mecanica cuantică, după care suma frecvențelor proprii ale celor două sisteme ce se influențează reciproc este constantă, iar această lege a fost interpretată de către fizicieni ca legea conservării energiei raportată la cuante și particule. Dar cuante sau particule nu există de loc. Orice încercare de a descrie fenomenele fizice prin folosirea conceptului de particule, fără a ajunge în contradicție cu modul bine stabilit de propagare în spațiu, caracteristic undelor, duce la reprezentări imposibile, absurde, cum este ipoteza salturilor cuantice atemporale ale particulelor dintr-o stare staționară într-alta. Și mai departe: dacă încercăm să descriem un gaz ca pe un sistem de particule, atunci sîntem nevoiți să le lipsim pe acestea de discernabilitatea individuală. Dacă se notează simbolul (A, B) ca o expresie pentru faptul că A se află într-un anumit loc, iar B într-un alt loc, atunci ambele cazuri (A, B) și (B, A) sînt nu numai fizic indiscernabile, dar reprezintă și din punct de vedere statistic un singur caz și nu două, după cum s-ar aștepta bunul simț. Toate aceste dificultăți și multe altele dispar o dată ce renunțăm la conceptul de particulă și vorbim numai despre unde.

II. *Există atomi ?*

Nu au trecut mulți ani de cînd Schrödinger a publicat o lucrare intitulată *2500 de ani de mecanică cuantică*, în care subliniază că descoperirea de către Planck a conceptului de cuantă constituie încoronarea unei dezvoltări neîntrerupte, care a început cu filozofii greci Leucip și Democrit, întemeietorii școlii atomistice. E evident că pe atunci Schrödinger considera ideea, după care materia e constituită din atomi, adică din particulele cele mai mici, indivizibile, ca o mare cucerire. Acum el respinge această

idee, deoarece consecințele sale mai îndepărtate produc confuzie în logica noastră.

Această poziție antiatomistă a lui Schrödinger este punctul care mi se pare cel mai slab și de fapt cel mai puțin rezistent în expunerile sale îndreptate împotriva interpretării uzuale a mecanicii cuantice. Toate celelalte argumente folosite sînt mai mult de natură tehnică, în schimb, acesta este fundamental. Schrödinger pune înaintea ambelor părți ale articolului său cîte un pasaj cu privire la „fundalul cultural”, în care îi acuză pe fizicienii teoreticieni ai timpului nostru de a fi pierdut simțul continuității istorice și de a-și supraaprecia realizările în comparație cu cele ale precursorilor lor. El prezintă în acest sens exemple cărora nu vreau să le iau apărarea; mi se pare totuși că el însuși constituie un exemplu încă mai supărător în ceea ce privește greșeala pe care o pune în discuție.

De la renașterea ideii atomistice în teoria cinetică a gazelor, datorită lui Daniel Bernouli (1738), și în chimie, datorită lui Dalton (1808), această idee s-a dovedit atît de extraordinar de fructuoasă și de eficientă, încît încercarea lui Schrödinger de a o arunca peste bord mi se pare aproape prezumțioasă, în orice caz, o încălcare evidentă a continuității istorice.

III. *Undele în locul atomilor*

O asemenea încălcare și-ar avea justificarea, dacă Schrödinger i-ar putea substitui o idee mai bună și mai eficientă. Tocmai aceasta și este pretenția lui: el afirmă că în fizică, la fel ca în chimie, orice stare de lucruri ar putea să fie descrisă cu ajutorul conceptului de undă. Cititorul nepregătit va crede desigur că e vorba despre undele obișnuite din spațiul tridimensional obișnuit. De abia în ultimul alineat al celei de-a doua părți (p. 241) Schrödinger spune că, în cazul general, avem de-a face cu un spațiu multidimensional, dar „că o expunere mai amănunțită în această privință nu și-ar avea rostul”. După părerea mea, aici e totuși vorba despre un punct esențial, care trebuie să fie discutat. Înainte de a face acest lucru, doresc totuși să subliniez că eu consider mecanica ondula-

torie a lui Schrödinger una dintre cele mai admirabile realizări din istoria fizicii teoretice. Știm, de asemenea, că Schrödinger a fost condus de repulsia sa față de teoria lui Bohr cu privire la stările staționare și la salturile cuantice, pe care a vrut să o înlocuiască prin ceva mai rațional. Îmi dau de asemenea foarte bine seama de triumful pe care l-a resimțit atunci când a reușit să interpreteze aceste detestabile stări staționare ca oscilații proprii inofensive, iar numerele cuantice, pline de mister, ca analoge numerelor de ordine ale armonicilor muzicale. Eu înțeleg că poți cădea pradă acestei idei frumoase.

În ce mă privește, eu nu am nici o preferință personală pentru unde. Eu am dezvoltat împreună cu Heisenberg și cu Jordan o altă metodă, și anume pe cea a mecanicii matriceale, în care stărilor staționare și salturilor cuantice le revine locul lor natural. Dar eu nici pentru ideile matriceale n-am vreo preferință deosebită. Îndată ce a fost publicată ecuația ondulatorie a lui Schrödinger, am aplicat-o la teoria ciocnirilor, care mi-a sugerat interpretarea funcției de undă ca probabilitatea amplitudinii¹. Am salutat eleganta demonstrație a lui Schrödinger pentru echivalența formală a mecanicii ondulatorii și a mecanicii matriceale. Dar nu vreau să iau cuvântul nici în favoarea mecanicii matriceale sau a generalizării sale de către Dirac, nici să atac mecanica ondulatorie. Vreau numai să resping pretenția exagerată a lui Schrödinger, din care cititorul nepregătit ar trebui să rămână cu impresia că toate fenomenele se lasă descrise ca unde obișnuite într-un spațiu obișnuit.

Fizicianul știe că lucrurile nu stau așa. În cazul problemei celor două corpuri (ca la atomul de hidrogen), ecuația undelor se descompune în două ecuații: una pentru mișcarea centrului maselor și una pentru mișcarea relativă,

¹ Într-adevăr, mărimea denumită în mod obișnuit funcție de undă este deja conținută în lucrarea lui Heisenberg, Jordan și a mea [„Z. f. Phys.“, 35 (1925), p. 557], deși nu ca funcție spațială φ , ci într-o reprezentare discretă x_n , cu ajutorul căreia a fost tratat calculul perturbațiilor în cap. 3, § 2, p. 585 și următoarele. Încă de pe atunci mi-a trecut prin cap interpretarea mărimilor $|x_n|^2$ ca probabilități. O fundamentare a acestei idei a trebuit însă să aștepte pînă ce metoda lui Schrödinger a făcut posibilă tratarea proceselor de ciocnire.

ambele în spațiul tridimensional. Dar, în problema celor trei corpuri (de pildă, în cazul atomului de heliu, care are un nucleu și doi electroni), acest lucru nu mai este posibil; pentru mișcarea relativă ar fi nevoie de un spațiu cu 6 dimensiuni. În cazul a N particule, e nevoie de un spațiu cu 3 ($N-1$) dimensiuni, și acest număr poate fi redus numai în cazuri particulare.

Aceasta înseamnă însă că susținerea intuitivității, adică a posibilității de a se reprezenta spațial desfășurarea evenimentului este iluzorie¹. În realitate, o funcție ondulatorie multidimensională nu este nimic altceva decât denumirea pentru mărimea abstractă ψ din domeniul formalismului matematic, care la unii fizicieni teoreticieni moderni poartă și denumirea, cu rezonanță mai erudită, „vector de stare în spațiul Hilbert“. Orice încercare de a descrie în cuvinte un fenomen oarecare, cu excepția celor mai simple, cu ajutorul acestei funcții de undă multidimensionale nu este decât o încercare de a exprima în limbajul nostru obișnuit conținutul concis al formulelor matematice. Aceasta ar fi însă nu numai extraordinar de greu, ci practic, pur și simplu imposibil.

De fapt, Schrödinger nici nu face vreo încercare în această direcție. Toate exemplele sale sînt astfel alese, încît e posibilă o reprezentare numai în trei dimensiuni, prin faptul că se limitează la cazuri care se referă (noi vrem să ne servim aici de conceptul de particule) la particule independente unele de altele, care nu se influențează reciproc, și apoi arată că aceste particule nu se comportă așa cum s-ar cuveni pentru particule adevărate, cumiți, ca de pildă, boabele de nisip.

IV. *De ce nu ne putem lipsi de atomi?*

După părerea mea, în pofida acestor ciudățenii, conceptul de particulă nu trebuie să fie totuși părăsit. După

¹ Într-un studiu apărut de curînd (Louis de Broglie, *Physicien et Penseur*, Editura Albin Michel, Paris, 1952), Schrödinger observă cum caracterul tridimensional al undelor ar putea fi menținut cu ajutorul metodei celei de „a doua cuantificări“ (p. 24). Dar intuitivitatea se pierde și în acest caz, iar caracterul statistic al funcției este introdus la un nivel încă mai înalt și mai abstract.

cum am mai spus, toată chestiunea litigioasă este, pentru calculele fizicienilor teoreticieni, destul de lipsită de importanță. Dar de îndată ce vrea să aducă rezultatele sale în corelație cu faptele experimentale, trebuie să facă afirmații și cu privire la aparatele fizice. Acestea sînt însă constituite din corpuri solide și nu din unde. Astfel, chiar dacă o descriere a realităților fizice ar fi posibilă prin folosirea exclusivă a reprezentărilor de undă, ar trebui totuși, în orice caz, să se facă de la un punct anumit trecerea la corpurile solide obișnuite. Dar legile care reglementează mișcarea corpurilor solide sînt, fără îndoială, cele ale mecanicii lui Newton. Teoria ondulatorie trebuie așadar în mod necesar să fie în stare să-și traducă rezultatele în limbajul mecanicii corpurilor obișnuite. Dacă acest lucru are loc în mod sistematic, atunci veriga necesară de legătură este mecanica matriceală sau una dintre generalizările sale. În orice caz, nu văd cum ar putea fi evitată această trecere de la mecanica ondulatorie la mecanica obișnuită a corpurilor solide.

Permiteți-mi acum să consider această corelație în sens invers, luînd ca punct de plecare corpurile obișnuite. Acestea pot fi divizate în părți mai mici și din ce în ce mai mici. În conformitate cu atomiștii greci, în acest fel se ajunge pînă la urmă la un sfîrșit, anume atunci cînd părțile devin particule, atomi, care nu mai pot fi subdivizate.

Teoria fizică modernă a modificat într-o anumită măsură această concepție, dar nu e nevoie să intru aici în amănunte, care sînt cunoscute oricui. Particulele de materie, care se obțin printr-o asemenea subdivizare neînteruptă, au toate aceleași proprietăți fizice ca și substanța de la care s-a pornit, pînă ce ne apropiem de atomul chimic. Cu toate că acesta nu este indivizibil, părțile sale sînt de acum încolo calitativ deosebite, particule de un gen mai subtil, respectiv sisteme constînd din nucleu și electroni. Descoperim că aceste unități de dimensiuni foarte mici, atomii, și încă mai mult, nucleeele și electronii nu numai că posedă alte proprietăți, dar că aceste proprietăți sînt categoric stranii, și nu sîntem deprinși cu ele în experiența noastră cu corpurile obișnuite. Comportarea lor se abate pe deplin de cea a granulelor în care am măcinat inițial substanța noastră. Ele nu au nici o individualitate proprie,

poziția și viteza lor pot fi stabilite doar cu o exactitate mărginită, pe baza relațiilor de imprecizie ale lui Heisenberg ș.a.m.d. Sîntem oare puși în situația de a spune: prea bine, trebuie așadar să renunțăm la conceptul de particulă și să abandonăm cu părere de rău întrebuințarea acestei imagini folositoare și atrăgătoare.

Putem proceda în acest fel, dacă acceptăm o poziție strict pozitivistă, după care unica realitate ar fi senzațiile noastre, iar tot restul, numai „construcții” ale minții noastre. Cu ajutorul aparatului matematic al mecanicii cuantice putem să prezicem ce anume va observa fizicianul experimentator în anumite condiții date: curentul, pe care-l indică galvanometrul său sau urma lăsată pe plăcile sale fotografice. Dar este fără sens a întreba ce se află în spatele fenomenelor: unde, sau particule, sau orice altceva. Mulți fizicieni au adoptat acest punct de vedere. Mie, personal, îmi repugnă cu totul și cu totul, și tot așa i se întîmplă și lui Schrödinger; căci el insistă asupra faptului că există ceva bine determinat în spatele fenomenelor, al senzațiilor, ceva ce poate fi descris ca o mișcare ondulatorie într-un mediu încă insuficient cercetat. De curînd, un fizician american, Bohm, a ocupat o poziție opusă. El susține că ar putea să interpreteze întreaga mecanică cuantică pe baza conceptului obișnuit de particule, și anume, cu ajutorul parametrilor „ascunși”, care servesc la descrierea proceselor inobservabile.

V. Cum poate fi modificată concepția atomistică

După părerea mea, nici unul din aceste două puncte de vedere extremiste nu poate rămîne în picioare, și consider ca justă calea interpretării obișnuite a teoriei cuantelor, care caută să pună de acord ambele moduri de descriere a fenomenelor observate: cea bazată pe conceptul de undă și cea bazată pe conceptul de particulă. Este imposibil, în acest cadru, să expun în întreaga ei complexitate analiza logică a acestor concepte; aș vrea numai să lămuresc, cu ajutorul unor exemple din alte domenii, felul în care ideea de particule este adaptată la noua situație. Firește că nu-i nimic nou în faptul că un concept luat în semnificația sa

inițială se dovedește prea strîmt croit. Dar în loc de a-l părăsi, știința a apucat pe un alt drum, care este incomparabil mai rodnic și mai satisfăcător. Un exemplu bun este conceptul de număr. La început, prin numere se înțelegeau numai numerele întregi, 1, 2, 3... Kroneker a spus că numerele întregi au fost create de dumnezeu, tot restul fiind opera oamenilor. Și într-adevăr, dacă numerele sînt definite ca un mijloc pentru a număra, atunci numerele raționale, fracțiile ca $\frac{2}{3}$ sau $\frac{4}{5}$, nu mai pot fi considerate numere. Dar încă grecii au extins conceptul de număr asupra numerelor raționale; ei au avut în vedere, ce-i drept, numai o mulțime finită de fracții, pentru care poate fi găsită unitatea cea mai mică (cel mai mic numitor comun). Ei au făcut însă atunci descoperirea fundamentală că diagonală pătratului cu latura 1, pe care noi o scriem astăzi $\sqrt{2}$, nu este un număr de acest tip. Oricît de genială era logica lor, ei n-au făcut totuși următorul pas constructiv: nu au avut îndrăzneala să lărgască atît de mult conceptul de număr, încît să poată cuprinde totodată și pe $\sqrt{2}$, ci au inventat pentru tratarea unor astfel de cazuri o metodă geometrică, care, deși ingenioasă, era totuși destul de greoaie. Aceasta a fost piatra de încercare care a reținut matematica vreo 2000 de ani. De-abia în timpurile moderne a putut fi întreprinsă generalizarea necesară a conceptului de număr, pentru ca să poată fi incluse și asemenea formații ca $\sqrt{2}$, pe care le denumim însă, în continuare, „irrationale“. Apoi au urmat alte generalizări, prin introducerea numerelor algebrice, transcendente și complexe. Cu toate că cu ajutorul acestora nu se poate număra, ele au totuși alte proprietăți, mai mult formale, comune cu numerele întregi, care devin de-acum încolo un caz particular al conceptului extins de număr. Generalizări asemănătoare ale unor concepte luate inițial într-un sens mult mai îngust sînt extrem de uzuale în matematică; dar ele se întîlnesc și în fizică. Este sigur că prin sunet se înțelegea inițial numai ceea ce poate fi auzit, iar prin lumină, ceea ce poate fi văzut. Astăzi vorbim însă despre sunete imperceptibile cu auzul (ultrasunete) și despre lumină invizibilă (ultravioletă și infraroșie). Acest proces al extinderii sensului inițial al conceptelor este în plină

desfășurare chiar și în viața de toate zilele. Să luăm ca exemplu conceptul de democrație, care însemna inițial forma de guvernământ a cetăților-state, unde cetățenii se întruneau în piața publică pentru a-și discuta problemele și pentru a lua decizii. Astăzi, această expresie semnifică forma parlamentară de guvernământ a unor mari formațiuni statale. Dar, permiteți-mi să revin mai bine pe terenul sigur al fizicii.

Eu sînt de părere că o întrebuintare mai largă a conceptului de particulă poate fi justificată în același fel. Ea trebuie să satisfacă doar două condiții : în primul rînd, conceptul inițial de particulă (ceva ce ia naștere prin divizarea continuă a materiei obișnuite și din care aceasta poate fi construită) trebuie să fie un caz special sau, mai bine zis, un caz-limită al noului concept, și în al doilea rînd, noul concept trebuie să păstreze unele proprietăți importante (chiar dacă în nici un caz pe toate) ale acestei reprezentări elementare.

Exact în acest fel este folosit astăzi conceptul de particulă în mecanica cuantică. Nu văd ce s-ar putea obiecta împotriva acestui lucru. Obiecțiile lui Schrödinger mi se par foarte asemănătoare cu reticențele care i-au împiedicat pe matematicienii greci să admită că diagonală pătratu-lui-unitate ar fi un „număr“, după ce s-au convins că nu poate fi reprezentată drept cîmul a două numere întregi. Dacă teza lui Schrödinger ar fi unanim acceptată, aceasta nu ar avea desigur urmări care să tragă atît de greu în balanță ca în cazul numerelor iraționale, pentru că ea nu se îndreaptă împotriva formalismului teoretic, ci numai împotriva substratului său filozofic. Schrödinger ar permite chiar fizicienilor și chimiștilor să utilizeze limbajul particulelor, cu condiția introducerii expresiei „ca și cum“. Să ne imaginăm un manual de chimie scris în acest fel : apa se comportă ca și cum s-ar compune din molecule H_2O , în care fiecare se comportă așa ca și cum ar fi alcătuită din cîte doi atomi de hidrogen și cîte un atom de oxigen. Dar dacă mai facem un pas, și spunem că fiecare atom de hidrogen are asemenea proprietăți, ca și cum ar fi constituit dintr-un nucleu și un electron, atunci trecem peste frontiera marcată de Schrödinger, lui „ca și cum“ ; căci Schrödinger insistă că nu există particule denumite

electroni, ci numai o undă de sarcină în jurul nucleului, care el însuși este de asemenea o anumită undă. Dar dacă vrem să vorbim după aceea despre fotoionizarea unui asemenea atom de hidrogen, atunci trebuie iar să revenim la acel „ca și cum“ al nostru, pentru a descrie excitația discontinuă a unui contor Geiger.

În viață, ca și în știință, dezvoltarea limbajului se bazează pe asemenea generalizări ale unor concepte care uneori, în cursul dezvoltării, sînt prevăzute mai întîi cu un „ca și cum“, dar mai tîrziu sînt asimilate și devin cuvinte de sine stătătoare, recunoscute. În acest scop, regulile destinate aplicării lor trebuie să fie stabilite în mod rațional. În domeniul fizicii, această dezvoltare, în cazul căreia Niels Bohr a jucat un rol conducător, tot mai este încă în curs de desfășurare, și anume, după cum văd eu lucrurile, cu rezultate bune. Bineînțeles că mai pot fi descoperite anumite puncte, la care apare o anumită duritate și denivelare logică, și Schrödinger a făcut tocmai acest lucru.

Pe de altă parte, nici Schrödinger nu poate să evite întrebuințarea cuvintelor particulă și atom, și ele ies la suprafață în multe din exemplele sale, deoarece altfel frazele sale n-ar putea să transmită nici un sens. De pildă, atunci cînd vorbește despre statistica cuantică a gazelor, trebuie să discute o ecuație a undelor într-un spațiu multi-dimensional. De pe poziția particulelor, această ecuație are o semnificație simplă, anume, ca traducerea legii conservării energiei cinetice a n particule în modul de exprimare al mecanicii ondulatorii. Schrödinger se vede pus în situația de a nega această traducere, copilul-minune al propriului său spirit, deoarece altfel ar trebui să admită că cel puțin într-un anumit sens există particule. El trebuie să admită că ecuația de unde 3 n -dimensională ar fi o inspirație genială, care s-a confirmat apoi experimental. Aceasta este însă o denaturare a realităților istorice.

VI. Coliziunile

Cu toate că aș ocoli cu plăcere amănuntele de pură specialitate, trebuie să mai inserez aici cîteva cuvinte cu privire la problema coliziunilor, pe care Schrödinger o dez

bate în mai multe locuri (paragrafele 6 și 8). El consideră că procedeul uzual al mecanicii cuantice e eronat și acuză pe fizicieni că folosesc un mod superficial de exprimare ; el susține că „fizica nu este un monolog“, și face profetia că opera fizicienilor moderni va fi uitată peste 2000 de ani, în timp ce opera lui Arhimede și a lui Galilei a supraviețuit unor perioade de timp de aceeași durată. Într-o scrisoare pe care mi-o adresează, el scrie : „Aproape toate succesele mari ale mecanicii cuantice constau în calcularea, cu rezultate bune, a unor sisteme întregi de valori proprii (ale energiei), de fiecare dată pe baza unei anumite ipoteze, mai mult sau mai puțin plauzibilă, cu privire la natura sistemului luat în considerație (a operatorului său Hamilton), și ele nu au nimic de-a face cu interpretarea statistică. Pe de altă parte, există experimentele cu privire la difuziune (calcularea secțiunii transversale diferențiale a interacțiunii, și altele asemenea). Singurul caz de confirmare cantitativă este, după cum pare, formula Klein — Nishina (aceasta descrie difuziunea de lumină sau de fotoni prin electroni). El pune mai departe sub semnul îndoielii faptul că interpretarea statistică, pe care eu am propus-o de prima dată, și care a fost formulată apoi de Von Neumann într-un mod cu totul general, ar putea fi aplicată în general la aceste cazuri.

Aș vrea să răspund că în principiu cunoaștem în definitiv valorile proprii ale energiei (funcția Hamilton) sistemelor materiale numai din experimentele cu privire la emisiunea, absorbția și difuziunea luminii sau electronilor. Toate aceste procese pot fi reduse la cuplarea sistemului luat în considerație cu un „cîmp de sondare“ (fie acesta un cîmp electromagnetic, sau de fotoni, sau un cîmp al undelor de electroni ai lui De Broglie), și mi se pare cu totul arbitrar de a desprinde dintre ele tocmai efectul de difuziune ca mai puțin respectabil decît celelalte două (emisiunea și absorbția). Mai presus de toate acestea, o privire peste literatura de specialitate, de pildă, cunoscuta carte a lui Mott și Mossey, sau importante lucrări ale lui Niels Bohr cu privire la trecerea particulelor prin materie, precum și multe alte cărți și articole, arată că numărul confirmărilor mai mult sau mai puțin cantitative ale legii difuziunii din domeniul statisticii cuantice este foarte mare

și că există de asemenea confirmări calitative deosebit de convingătoare ale acestei legi. Chiar în fizica nucleară, unde cunoștințele noastre despre legea interacțiunii (funcția Hamilton) sînt nesigure și sărăcăcioase, principiile statisticii cuantice au fost aplicate cu mare succes. Bomba atomică dă o mărturie pregnantă despre mărimea acestui succes.

În ceea ce privește însă scepticismul lui Schrödinger față de prescripția generală pentru trecerile cuantice (salturile cuantice) în cazul coliziunilor, nu mă simt în stare să urmăresc argumentele sale. El descrie procedeul astfel, de parcă coliziunea ar fi întotdeauna o trecere între două stări cu energie diferită. În realitate, coliziunea „elastică” tipică este o trecere între stări de aceeași energie, dar cu vectori de impuls diferiți. Metoda după care am tratat eu inițial acest caz al coliziunii elastice evită orice referire la timp: se consideră o undă incidentă staționară, care reprezintă o rază formată din particule, de la care se desprinde prin interacțiune cu un atom o undă sferică, reprezentînd particulele ricoșate, împrăștiate. În cazul acestui mod de examinare, nu există nici o stare de început și nici o stare de sfîrșit, două concepte care, din punctul de vedere al lui Schrödinger, nu sînt strict definite. Totuși, aceste concepte ies la suprafață în reprezentarea dată de Dirac teoriei coliziunilor, în care el concepe ciocnirea ca un caz special al teoriei generale despre trecerile temporale (așa cum a fost formulată pentru prima dată în lucrarea mea despre „invarianții adiabatici” și în publicațiile concomitente ale lui Dirac și apoi desăvîrșită de către J. von Neumann). Dirac a arătat totuși că metoda sa, în care se face uz de durata de timp, este matematic echivalentă cu metoda „staționară”. Dificultățile conceptuale, pe care le impută Schrödinger, sînt, prin urmare, doar o chestiune de formulare îngrijită.

O altă obiecție a lui Schrödinger se referă la metoda aproximațiilor, pe care eu am introdus-o în lucrările mai timpurii, pentru a rezolva ecuația de difuziune, foarte complicată din punct de vedere matematic. Această metodă duce în primă aproximație la rezultate rezonabile, în parte bine confirmate; este totuși greu să te ridici la aproximații de ordin superior, și chiar dacă acest lucru reușește, apar cazuri care duc la integrale divergente. Există

totuși alte metode, care folosesc cu totul alte dezvoltări (de pildă, serii de funcții sferice și funcții Bessel) și duc la rezultate matematice ireproșabile și în bună concordanță cu experimentele.

Eu nu pot înțelege, la drept vorbind, ce legătură pot avea aceste obiecții pur matematice cu chestiunile litigioase „particule sau unde” și „salturile cuantice”. Pentru că chiar dacă am privi din punctul de vedere al lui Schrödinger, după care nu există nici un fel de particule, ci numai unde, calculele difuziunii ar rămîne totuși neschimbate. Singura deosebire ar fi că noi vorbim despre intensitatea unei incidente și a celei împrăștiate (unde electromagnetice, de electroni, de protoni sau orice ar fi), și nu am interpreta această intensitate de undă ca probabilitate pentru prezența unor particule. Problema propriu-zisă, în jurul căreia se învîrtește Schrödinger este dacă această interpretare a probabilității are sau nu vreun sens. Scrupulele sale matematice nu au nimic de-a face cu aceasta. Pentru a lămuri această chestiune esențială, pot fi luate în considerație, de pildă, experimentele lui Rutherford cu privire la împrăștierea radiațiilor α cînd dau de nucleu. Printr-un fel de fericită întîmplare matematică, aici calculele clasice (care operează cu particule, supuse legilor mecanicii lui Newton) și calculele din domeniul mecanicii ondulatorii (care în acest caz pot fi duse la capăt cu strictețe) dau același rezultat. Această formulă de dispersie a lui Rutherford se confirmă prin cantitățile de particule α în raza incidentă și împrăștiată (pentru diferite direcții de dispersie), iar acest rezultat este cu totul independent de metoda de calcul, fie că aceasta constă din numărarea vizuală a scintilațiilor unui ecran de sulfură de zinc fie din utilizarea unor aparate automate de diferite tipuri, de pildă contorul Geiger. Cum ține Schrödinger seama de aceste fapte? După cît îmi pot da seama, el nu are pentru aceasta nici o explicație. Se pare că el e de părere că nu discontinuitatea radiației este cea care furnizează rezultate calculabile, ci că acestea ar fi provocate de o anumită proprietate a dispozitivului de calcul. Cum poate fi însă explicat faptul că rezultatul este în așa fel independent de calculator, și încă în așa măsură, încît fulgerele de lumină din micile cristale ale

ecranului din sulfură de zinc și descărcările în tuburi umplute cu gaz, legate de un complicat aparat amplificator, înregistrează același număr (în medie) de evenimente? Datorită aversiunii sale față de ideea de particulă, aici Schrödinger este constrâns să ia o atitudine aproape mistică; el se limitează să-și exprime speranța că viitorul va rezolva această enigmă într-un mod multumitor.

VII. *Cuvînt de încheiere*

Nu a fost în intenția mea să discut, în acest cadru, în mod amănunțit interpretarea statistică a mecanicii cuantice. Aceasta nu ar fi fost de loc o sarcină simplă și ar fi cerut, pe lîngă cunoașterea unui complicat formalism matematic, și o anumită poziție filozofică: disponibilitatea de a sacrifica conceptele tradiționale și de a accepta altele noi, cum ar fi, de pildă, principiul complementarității, al lui Bohr. Eu sînt foarte departe de a afirma că interpretarea astăzi curentă ar fi perfectă și definitivă, și salut atacul lui Schrödinger împotriva apatiei pline de multumire de sine, cu care mulți fizicieni preiau pur și simplu interpretarea uzuală pe baza utilității sale practice și nu-și mai sparg capul în continuare cu problema dacă se află pe baze solide. Cu toate acestea, nu cred că articolul lui Schrödinger înseamnă o contribuție pozitivă la rezolvarea dificultăților filozofice. Nu este ușor pentru mine să supun criticii vederile filozofice ale unui prieten, pe care eu îl admir în mod sincer ca pe un mare savant și un profund gînditor. De aceea vreau să aleg pentru apărarea propriei mele concepții o metodă pe care nici Schrödinger nu e atît de mîndru ca să nu o folosească, adică referirea la autorități recunoscute, care împărtășesc punctul meu de vedere. Drept martor al meu îl iau pe W. Pauli, care este recunoscut între confrății care au contribuit la dezvoltarea mecanicii cuantice ca fiind cel mai critic și mai exigent, atît din punct de vedere logic cît și din punct de vedere matematic. Fragmentul care urmează este dintr-o scrisoare pe care am primit-o de curînd de la Pauli:

„Împotriva tuturor eforturilor reacționare (Schrödinger, Bohm și alții, iar într-o anumită măsură și Einstein), sînt convins că, caracterul statistic al funcției Ψ și totodată al legilor naturii — pe pozițiile căruia dumneavoastră v-ați menținut de la început împotriva rezistenței lui Schrödinger — va determina stilul legilor cel puțin pentru cîteva secole. S-ar putea ca mai tîrziu să se găsească, de pildă, în legătură cu procesele vitale ceva cu totul nou, dar să visezi despre un drum înapoi, înapoi la stilul clasic al lui Newton-Maxwell (și sînt numai vise, căroră, li se abandonează acești domni), mi se pare fără speranță, eronat, de prost-gust. Și, am mai putea să adăugăm, nici nu este vorba măcar, despre un vis frumos”.

Ceea ce Pauli denumeste aici „stilul” unei construcții de idei este, cu alte cuvinte, atitudinea filozofică a unei epoci, care îi determină fundamentele culturale. Aceste chestiuni fundamentale sînt cele în care Schrödinger și cu mine sîntem de păreri diferite, și de aceea perspectivele de împăcare sînt foarte mici.

*Realitatea fizică**

În cursul ultimilor 100 de ani ideea de realitate în lumea fizică a devenit întrucîtva problematică. Contradicția dintre realitatea simplă și evidentă a numeroaselor instrumente, mașini, motoare și aparate de tot felul, pe care le produce industria și care sînt în fond fizică aplicată, și semnificația neclară și abstractă a unor astfel de noțiuni fundamentale din fizică, cum sînt forțele și cîmpurile, particulele și cuantele, este fără îndoială derutantă. Între știința pură și cea aplicată și între reprezentanții lor s-a format o prăpastie care poate să conducă la o înstrăinare periculoasă. Fizica are nevoie de o filozofie generalizatoare care să se poată exprima în limba de toate zilele, pentru a arunca o punte peste această sciziune din „realitate”, așa cum e concepută ea în teorie și în practică. Eu nu sînt filozof, ci un specialist în fizică teoretică. Nu pot deci să ofer nici o filozofie a naturii bine cîntărită, care să țină seamă în mod convenabil de ideile diferitelor direcții; aș vrea numai să expun unele idei care m-au ajutat pe mine în propriile mele abordări ale acestei probleme.

Printre specialiștii în fizică teoretică și filozofii științelor naturii există o direcție de gîndire care susține un punct de vedere radical abstract. Această filozofie este expusă, de exemplu, de către H. Dingle [1] în remarcabila sa conferință ținută în fața „British Association” din Edin-

* Tradus din engleză după „Philosophical Quarterly”, 3 (1953), p. 139; publicat în „Die Pyramide”, 3 (1953), p. 82 și în „Physikalische Blätter”, 10 (1954), p. 49.

burgh. Nu pot să-mi lămuresc mai bine propriul punct de vedere decât comparându-l cu cel opus. Dacă voi cita extrase din conferința lui Dingle, nu o voi face din dorința unei polemici personale. Aceste citate trebuie să servească doar ca exemple potrivite pentru a-mi dezvolta propriile opinii, deosebite de-ale lui.

Să începem cu următoarea propoziție: „Obiectele cu care se ocupă fizica nu sînt măsurători ale proprietăților obiective proprii unor porțiuni din lumea materială exterioară; ele sînt numai rezultatele pe care le obținem cînd efectuăm anumite operații“. Această definiție apare ca o negare a existenței unei lumi materiale existente în sine; ea creează impresia că fizicianul nu s-ar interesa de lumea reală și ar face experimente numai pentru a prezice anumite rezultate ulterioare. Altfel, nu se explică de ce se mai ostenește fizicianul de a efectua experiențe. Se pare că această chestiune este considerată ca nedemnă pentru un filozof al naturii. Putem oare să ne mai punem întrebarea ce rol joacă într-un asemenea sistem de obiecte instrumentele din oțel, alamă, sticlă etc. care au fost alcătuite cu grijă și pregătite pentru un experiment? Oare nici ele nu sînt o parte a lumii materiale exterioare existente în sine? Sînt și ele, ca și electronii, atomii și cîmpurile, idei pur abstracte de care avem nevoie pentru a prezice fenomenul pe care-l vom putea observa la experimentul următor și care nu reprezintă la rîndul său decât tot o colecție de fantome? Ni se înfățișează aici o concepție de un subiectivism extrem, care s-ar putea numi pe bună dreptate „solipsism fizic“. Este binecunoscut că un solipsism susținut cu încăpăținare nu poate fi respins cu ajutorul unor argumente logice. Se poate totuși afirma că solipsismul nu rezolvă problema, ci o ocolește. Consistența logică este un criteriu pur negativ. Nici un sistem nu poate fi admis numai în virtutea faptului că este logic consistent. Singurul argument pozitiv în sprijinul acestui mod abstract de ultrasubiectivism este de ordin istoric. Se spune că credința în existența unei lumi exterioare ar fi lipsită de semnificație, iar pentru progresul științei ar fi de-a dreptul o piedică. Întregul domeniu al fizicii ar putea fi înțeles în mod satisfăcător numai ca o descriere a „experienței“, însă nu a unei lumi exterioare.

În realitate, lucrurile stau cu totul altfel. Toate marile descoperiri în fizica experimentală se datorează intuiției unor oameni care s-au folosit în mod deschis de modele care pentru ei nu erau produse ale fanteziei, ci reprezentau lucruri reale. Cum ar fi putut lucra experimentatorul și cum ar fi putut el comunica cu colaboratorii și contemporanii săi, fără să fi folosit modele formate din particule, electroni, nucleoni, neutroni, câmpuri și unde — concepte care acum sînt acuzate ca fiind neesențiale și sterile ?

Există desigur o motivație și pentru acest punct de vedere extremist. Noi am aflat deja că în folosirea acestor concepte este necesară o anumită prudență. Abordarea naivă a problemei realității, care a fost încununată de succes în perioada clasică sau *newtoniană*, s-a dovedit a fi nesatisfăcătoare. Teoriile moderne pretind o reformulare a modului de a pune chestiunea. Această nouă formulare se dezvoltă încet și probabil n-a ajuns încă la o expresie definitivă. Voi încerca să schițez tendințele actuale.

Din capul locului trebuie să ținem seama de faptul că cuvîntul „realitate“ este o componentă a limbii noastre cotidiene, și de aceea — ca și majoritatea cuvintelor — nu are o semnificație univocă. Există filozofii subiective care susțin că numai lumea spirituală este reală și că lumea fizică n-ar fi decît o aparență, o umbră fără substanță. Deși acest punct de vedere prezintă un foarte mare interes filozofic, el se află în afara discuției noastre, care nu se ocupă decît de realitatea fizică. Rămîn însă deschise destule alte probleme. „Realitățile“ unui țaran sau ale unui meseriaș, ale unui negustor sau ale unui bancher, ale unui om de stat sau ale unui soldat au desigur foarte puține elemente comune. Pentru fiecare dintre ei, obiectele cele mai reale sînt acelea care se află în centrul intereselor lor, cuvîntul „real“ fiind în acest caz, aproape sinonim cu „important“. Mă întreb dacă există vreo filozofie care să poată defini astfel conceptul de realitate, încît el să nu mai poată fi influențat ulterior de asociații subiective de acest fel. În special, ne întrebăm dacă științele naturii pot să dea o asemenea definiție.

Astfel ajungem la al doilea punct pe care îl promovează Dingle, și anume, dacă utilizarea conceptului și a

cuvîntului „realitate“ n-ar putea fi înlăturată, fără a păgubi științele naturii. Răspunsul meu la această întrebare este că la utilizarea acestui concept pot renunța numai oamenii care locuiesc în castele aeriene, îndepărtați de orice practică și de orice acțiune și observație reală, adică acel tip de om care se adîncește atît de mult în matematica pură, în metafizică sau logică, încît se înstrăinează de lume. Niels Bohr, care a contribuit mai mult decît oricare altul la filozofia științelor moderne ale naturii, a subliniat în repetate rînduri și în mod accentuat că este imposibil să descrii un experiment real fără să folosești limba uzuală și conceptele realismului naiv. Fără a recunoaște acest lucru, este de neconceput orice înțelegere despre fapte chiar între spiritele cele mai alese. O parte esențială a acestei proceduri constă în aceea că se face o distincție între idei, proiecte, teorii și formule, pe de o parte, și instrumentele și invențiile reale, care sînt construite conform acelor idei, pe de altă parte. Aici utilizarea naivă a cuvîntului real, simpla credință în existența reală a aparaturii materiale, este absolut necesară. Presupun că școala abstractă pe care o reprezintă Dingle nu neagă acest lucru, deși nici el nu-l afirmă în mod explicit. El interzice totuși aplicarea conceptului de realitate la atomi, electroni, cîmpuri ș.a.m.d., adică la termeni care se folosesc cînd se interpretează observațiile. Dar unde este granița dintre aceste două domenii? O bucată de cristal care ține de domeniul realității macroscopice poate fi pisată mărunt, pînă ce particulele sale vor deveni prea mici pentru a mai putea fi receptate cu ochiul liber. Pentru a le vedea, trebuie folosit microscopul. Devin prin aceasta particulele mai puțin reale? Particule și mai mici, coloizii, apar în ultramicroscop, în cazul unei luminări corespunzătoare, ca puncte strălucitoare lipsite de structură. De la aceste particule la moleculele simple sau la atomi trecerea este continuă. Cînd ultramicroscopul se dovedește insuficient, se poate folosi microscopul electronic, cu ajutorul căruia se pot vedea chiar molecule mari. Atunci unde se încheie realitatea macroscopică, în care trăiește experimentatorul, și unde începe lumea atomilor, din care ideea de realitate trebuie alungată ca fiind iluzorie?

Evident, nu există o asemenea graniță ; dacă sîntem nevoiți să atribuim realitate obiectelor uzuale din viața de toate zilele — inclusiv instrumentelor și materialelor folosite în experiențe —, atunci nu putem nega nici realitatea acelor obiecte pe care le putem observa numai cu ajutorul instrumentelor. Dar faptul că le considerăm drept reale, drept părți ale lumii exterioare, nu ne obligă încă la o anumită descriere ; un lucru poate să fie real și totuși să se deosebească mult de celelalte lucruri ce ne sînt cunoscute.

Aș vrea acum să discut cîteva exemple pe care le aduce Dingle pentru a arăta că în fizică conceptul de realitate obiectivă nu funcționează.

Primul său exemplu este teoria cinetică a materiei. Dingle vorbește de metoda statistică care — fără a se preocupa de traiectoriile separate ale moleculelor — se mulțumește să calculeze valorile medii pentru reprezentarea „observațiilor (adică aparițiilor)” ; această poziție el o caracterizează ca „o trădare a adevăratei misiuni a fizicii, așa cum o vede filozofia, unanim recunoscută. Lor (fizicienilor) li s-a dat sarcina de a cerceta realitatea, ceea ce ei au interpretat ca cercetare a naturii și comportării moleculei. În loc de a urmări cercetarea realității, ei s-au îndeletnicit să arate în ce mod necunoașterea de către ei a realității poate fi utilizată pentru a descrie aparițiile pure”. Nu m-am putut lămuri dacă Dingle consideră de prisos întreaga teorie cinetică sau dacă el neagă doar realitatea moleculelor, pe care le denumeste „fise” sau „atrape” („counters” sau „dummies”). Căci el nu face nici o încercare de a analiza materialul faptic pe care l-a acumulat teoria cinetică în favoarea existenței moleculei. Aș vrea să schițez în cîteva cuvinte o asemenea analiză.

Deducerea cinetică a legii lui Boyle dovedește numai că o explicație atomistică este posibilă, dar nu poate fi luată în considerație ca o dovadă definitivă. Dacă însă această derivare se formulează mai exact, atunci ea conduce la o anumită valoare a energiei medii, și prin aceasta a căldurii specifice ($\frac{3}{2} R$ pentru gaze monoatomice, unde

R este constanta gazelor), pe care n-o poate furniza nici un raționament fenomenologic. Formula generală pentru

energia medie conține numărul gradelor de libertate ale moleculelor, sau „dummies” pentru a folosi expresia lui Dingle. Interpretarea cinetică a abaterilor de la legea lui Boyle conduce la o evaluare a mărimii moleculelor, care este confirmată de către un cu totul alt grup de fenomene, procesele ireversibile de conductibilitate calorică, viscozitate și difuzie. Multe concepte care la început au fost introduse de teorie, ca de exemplu distribuția vitezelor, lungimea traiectoriei libere etc., au fost confirmate și determinate prin măsurători directe. Abaterile prezise de către teoria cinetică pot fi observate în diferite feluri, ca de exemplu, în mișcarea browniană, în coloritul albastru al cerului etc.

Firește, toate acestea sînt — după cum spune Dingle — fenomene, „apariții”, moleculele rămînînd ascunse. Dar sare în ochi un punct pe care Dingle nu îl amintește, și anume că teoria cinetică conduce la anumite proprietăți ale moleculelor, ca masă, mărime, formă (grad de libertate și acțiune reciprocă). În virtutea ipotezei moleculare, un număr mic de constante moleculare determină un număr foarte mare de proprietăți fenomenologice, și orice proprietate nouă care este prevăzută constituie o confirmare a ipotezei moleculare. Asemenea previziuni sînt realizări uimitoare, ca de exemplu, Lauegramele datorate trecerii radiațiilor Roentgen prin cristale, precum și întreg domeniul fenomenelor radioactive. Aici demonstrația realității moleculelor este atît de concludentă, încît a vorbi de un „dummy” care lasă urme într-o cameră Wilson sau într-o emulsie fotografică pare puțin potrivit.

Să comparăm acest fel de realitate cu cazul următor : Să presupunem că vedem cum se trage dintr-o pușcă și cum cade un om la o distanță de 100 de metri. De unde știm că glonte din rană a zburat într-adevăr de la pușcă la om? Doar nimeni n-a văzut acest lucru. Și nici nu l-ar fi putut vedea, cu excepția unui cercetător științific care ar fi făcut pregătirile necesare, adică ar fi pus în funcțiune un aparat optic complicat, asemănător cu acela pe care l-a inventat odinioară Mach pentru fotografierea proiectilelor zburătoare. Și totuși, sînt convinși că oricine va fi de acord că în micul interval de timp dintre descărcarea armei și rănirea omului glonte a parcurs o tra-

iectorie ; se consideră de asemenea că glonte a fost realmente acolo în tot intervalul de timp. Sau poate că ne-am declara mulțumiți cu simpla constatare : „Vai, asta n-o știu ; îmi este suficient să știu că au avut loc fenomenele de tragere și de rănire. 'Tot ce s-a produs între ele este un joc al fanteziei teoretice ; glonte în zbor este un simplu «dummy» pentru a lega cele două fenomene prin legi ale mecanicii“. Nu pot să resping o asemenea atitudine cu argumente logice. Doresc doar să subliniez că oricine pune la îndoială forța probatoare a unei urme de atom, cu toate că aceasta este vizibilă, trebuie să pună la îndoială și existența glontelui care zboară și nu este vizibil, ceea ce este valabil și pentru numeroase alte lucruri asemănătoare.

Rădăcina acestei ciudate îndoieli cu privire la realitatea moleculelor și a altor lucruri este interpretarea conceptului de „real“, în sensul de „cunoscut în toate amănuntele“. Dar aceasta nu coincide cu utilizarea obișnuită a cuvântului. Noi ni-i reprezentăm ca reali pe toți cei 500 de milioane de chinezi, deși poate că nu cunoaștem personal nici unul, sau numai un număr restrâns de indivizi, și nu știm nimic despre locul unde se află, despre activitățile, mișcările și reacțiile lor. Noi ni-i reprezentăm ca reali pe romanii de pe vremea lui Cezar sau pe chinezii de pe vremea lui Confucius, deși nu avem nici o posibilitate să verificăm această idee în felul cum o pretinde Dingle pentru molecule. Oare acești romani și chinezi din prezent sau din trecut sînt numai „atrape“, pe care istoricul le-a inventat pentru a lega între ele anumite fenomene ? Și care fenomene ? Poate cuvintele care se află în ziare, cărți și pe vechile pietre funerare ?

Toate aceste considerente rămîn însă la suprafața lucrurilor și nu ating adevăratele dificultăți pe care le întîmpină fizica și care ne constrîng la o revizuire a conceptelor noastre fundamentale. Exemplul următor al lui Dingle, relativitatea, ne apropie întrucîtva de aceste probleme. El afirmă că „în concordanță cu filozofia timpului nostru, lumea materială — independent dacă este considerată ca fiind constituită din molecule sau din corpuri macroscopice — a fost prezentată ca și cum ar poseda proprietățile sale în mod intrinsec ; părțile ei componente

au mărime, masă, viteză etc." După ce dezvoltă această idee, el continuă: „Și iată că cerința fundamentală a teoriei relativității constă în aceea că toate aceste proprietăți să fie aproape nedeterminate“, și ca exemplu dă noțiunile de lungime și masă, care, conform cu teoria relativității, depind de viteza observatorului. Una și aceeași lungime, măsurată de observator în mișcare relativă, poate oscila între un maxim și zero, iar una și aceeași masă, între un minim și infinit. El ajunge la concluzia că „dând la o parte toate încercările de a atribui materiei anumite proprietăți, aflăm tot mai multe despre relațiile dintre fenomene“. Dar aceasta este o prezentare falsă a teoriei relativității, care niciodată n-a renunțat la încercarea de a atribui materiei proprietăți, ci a ameliorat doar metodele utilizate în acest scop, pentru a se pune de acord cu anumite experimente noi, cum a fost renumitul experiment al lui Michelson și Morley.

De fapt, acest exemplu este foarte potrivit pentru a ajunge la fondul lucrurilor. Și anume, la o distincție logică cu totul elementară — necesarmente evidentă pentru oricine nu este copleșit de prejudecățile unei metafizici solipsiste —, după care adesea o mărime măsurabilă nu este proprietatea unui obiect, ci este o proprietate a relațiilor sale cu celelalte obiecte.

Să dăm un exemplu. Să tăiem o figură, să zicem un cerc, dintr-o bucată de carton și să observăm umbrele aruncate de o lampă îndepărtată pe un perete neted. În general, umbrele cercului vor apare ca elipse; rotind cercul în mod convenabil, putem obține orice valoare a lungimii axei umbrei eliptice, între una foarte apropiată de zero și un anumit maxim. Aceasta este cu totul analog cu comportarea lungimii în teoria relativității, care în diferitele stări ale mișcării poate să ia orice valoare între zero și un anumit maxim. Dacă doriți să obțineți un analog cu comportarea masei care, în funcție de viteză, poate să ia orice valoare între un minim și infinit, atunci luați un cârnat lung și faceți secțiuni sub diferite unghiuri, obținând elipse, la care o axă se va situa între un minim și infinitul „practic“. Să revenim însă la umbra cercului; este evident că luarea în considerare, simultană, a umbrelor pe mai multe planuri diferite este suficientă pentru a

demonstra că figura inițială tăiată din carton este un cerc și pentru a-i determina în mod univoc raza. Această rază este ceea ce matematicienii numesc un invariant al transformărilor prin proiecții paralele. Tot astfel, există un invariant pentru toate secțiunile printr-un cîrnat, și anume, secțiunea de arie minimă. Majoritatea măsurătorilor din fizică se referă nu la obiectele care ne interesează, ci la un fel de proiecții ale lor, cuvîntul proiecție fiind utilizat, în acest caz, în sensul cel mai larg. Se pot folosi de asemenea expresiile de coordonată sau componentă.

Proiecția (în exemplul nostru cu umbra) este determinată relativ la un sistem de referință (pereții pe care poate să fie aruncată umbra). În cazul general, există multe sisteme de referință echivalente. În fiecare teorie fizică există o regulă care leagă între ele proiecțiile aceluiași obiect în raport cu diferitele sisteme de referință. Această regulă se numește lege de transformare; toate aceste transformări au proprietatea de a constitui un grup, adică rezultatul a două transformări succesive este o transformare de aceeași natură. Invarianții sînt mărimi care au aceeași valoare pentru fiecare sistem de referință și deci sînt independenți față de transformări.

Progresul principal în structura conceptuală a fizicii constă tocmai în descoperirea că o anumită mărime care la început a fost considerată ca proprietate a unui obiect este în realitate numai proprietate a unei proiecții.

Un exemplu în acest sens este dezvoltarea teoriei gravitației. În limbaj matematic modern spunem că concepția primitivă sau prenewtoniană a forței de greutate era legată de un grup de transformări pentru care verticala — perpendiculara pe suprafața terestră plană — este absolut fixă. Pentru aceste transformări, mărimea și direcția forței de greutate sînt invarianți, ceea ce înseamnă că greutatea este o proprietate esențială a corpului. Situația s-a schimbat întru totul cînd Newton a descoperit că forța greutății este numai un caz particular al gravitației generale. Grupul de transformări a fost atunci extins astfel, încît spațiul a devenit izotrop, lipsit de o direcție fixă; forța greutății a devenit acum doar o componentă a forței gravitaționale.

Teoria relativității s-a dezvoltat mai departe în această direcție. Transformările mecanicii clasice, numite adesea și transformările lui Galilei, separau spațiul de timp. Dar experimentele care și-au găsit reflectarea în teoria relativității au arătat că această separare nu corespunde faptelor. Este necesar un grup mai general, grupul transformărilor Lorentz, care dă o legătură strânsă între coordonatele spațiale și timp. Firește că mărimile, care în vechile teorii erau considerate ca invariante, ca de exemplu distanțele în sistemele rigide, intervalele de timp indicate de ceasornice situate în locuri diferite și masele corpurilor, apar acum ca proiecții, apar în calitate de componente ale unor mărimi invariante care nu sînt accesibile direct. Totuși, invarianții pot fi stabiliți, așa cum s-a procedat în cazul umbrelor, prin determinarea unui număr de asemenea componente. Se constată astfel că lungimea maximă și masa minimă sînt invariante relativiste. Poate că s-ar fi procedat mai bine dacă acești invariante, care sînt proprietăți ale corpurilor, ar fi fost denumiți cu vechile denumiri de lungime, timp, masă, găsindu-se denumiri noi pentru proiecțiile lor. Dar în asemenea chestiuni, științele naturii sînt de un conservatism uluitor. Și astfel, prin consens unanim, s-a ajuns să se schimbe denumirea invarianților în lungime de repaus, timp propriu, masă de repaus etc. și să se păstreze vechile denumiri pentru componente, deși acestea nu sînt proprietăți ale unui corp, ci numai proprietăți ale relațiilor sale cu sistemul de referință.

Părerea mea este că ideea de invariant constituie o cheie pentru înțelegerea rațională a conceptului de realitate ; și aceasta nu numai în fizică, ci și în cazul oricărui aspect al lumii.

Teoria grupurilor de transformări și a invarianților lor este o ramură fundamentală a matematicii. Încă în 1872, marele matematician Felix Klein a abordat, în renumitul său *Program de la Erlangen*, clasificarea geometriei din acest punct de vedere ; teoria relativității poate fi considerată ca o extindere a acestui program la geometria spațio-temporală cvadridimensională. Din acest punct de vedere, problema realității capătă, în ce privește materia macroscopică, un răspuns clar și simplu.

Situația este mai dificilă în fizica atomică. Este bine cunoscut că legile mecanicii cuantice conduc la o nedeterminare care se exprimă prin relația de incertitudine a lui Heisenberg. Oare această nedeterminare, această imposibilitate de a răspunde la anumite întrebări cu privire la poziția și viteza unei particule este un argument împotriva realității particulelor și, în general, a întregii lumi reale obiective? Aici trebuie să ne lămurim ce înțelegem printr-o particulă, de exemplu un foton, un electron, un mezon sau un nucleon, în raport cu materialul demonstrativ experimental; și din nou ne dăm seama că aceste cuvinte denotă anumiți invarianti, care pot fi stabiliți ferm și univoc pe baza unei combinări, a unui număr de observații.

Teoria transformărilor, care îi stă la bază, este destul de complicată și nu pot să dau decît o indicație scurtă și în linii mari. Esența chestiunii poate fi lămurită cu ajutorul razelor obișnuite de lumină.

Caracterul ondulatoriu al luminii a fost demonstrat de către Young și Fresnel prin faptul că două raze de lumină generate prin descompunerea uneia dau inele de interferență, atunci cînd se întîlnesc. Aproape 100 de ani mai tîrziu, Einstein a explicat efectul fotoelectric ca o acțiune a cuantelor de lumină, fotonii, care atunci cînd nimeresc pe o suprafață de metal, eliberează electroni. Așadar, lumina are și un caracter corpuscular, fapt care a fost confirmat prin numeroase experiențe. Uimitor aici este faptul că între aceste două concepte aparent contradictorii există o relație cantitativă simplă, pe care Planck o dedusese încă cu cinci ani în urmă din comportarea radiației termice. Și anume $E = h\nu$, unde E este energia fotonului, ν este frecvența undei, iar h este o constantă. Dificultățile înțelegerii decurg din faptul că energia E este concentrată într-o particulă foarte mică, în timp ce frecvența ν sau, mai bine zis, lungimea de undă $\lambda = c/\nu$ necesită pentru determinarea sa un tren de unde (practic) infinit.

Acest paradox poate fi rezolvat numai dacă sacrificăm un concept tradițional. După cum se știe, în prezent, trebuie să renunțăm la ideea că particulele considerate în sine ascultă de legi deterministe asemănătoare cu cele din me-

canica clasică. Teoria poate prezice numai probabilități, iar acestea sînt determinate de unde (ele sînt pătrate de amplitudini). Aceasta înseamnă, firește, o modificare decisivă în poziția noastră față de natură. Ea ne cheamă la o nouă cale de descriere a lumii fizice, dar nu la negarea realității sale. Esența noii metode poate fi lămurită cel mai bine cu ajutorul unui exemplu simplu.

Să lăsăm o rază de lumină să treacă printr-o *prismă Nicol*; ea va fi polarizată liniar. Această rază primară, care are, să zicem, amplitudinea A s-o expediem printr-un cristal cu dublă refracție; rezultă atunci două raze secundare, polarizate liniar perpendicular una pe cealaltă. Dacă θ este unghiul dintre direcția de polarizare a razei primare și a uneia dintre cele două raze secundare, atunci amplitudinile acestora din urmă vor fi $A \cos \theta$ și $A \sin \theta$. Intensitățile lor sînt deci în raportul $\cos^2 \theta : \sin^2 \theta$. Dacă acum intensitatea primară este micșorată pînă ce cu ochiul liber nu se mai poate vedea nimic, putem totuși observa și număra fotonii cu ajutorul unui fotoelement sensibil și al unei amplificări convenabile. Și anume, vom găsi că numărul lor mediu în razele secundare se află raportul $\cos^2 \theta : \sin^2 \theta$. Acesta este exemplul cel mai simplu pentru interpretarea statistică mai sus amintită, după care probabilitățile sînt determinate de pătratele amplitudinilor undelor. Aș vrea să subliniez acum în mod deosebit faptul că aceste amplitudini secundare sînt proiecții ale amplitudinilor primare pe două direcții determinate de către instrument. Previziunile pe care le face teoria cu privire la intensitatea razelor emise sau cu privire la numărul fotonilor pe care ele le conțin au sens numai referitor la întreaga instalație experimentală, formată din *prisma Nicol* și cristal.

Acest exemplu este tipic pentru fenomenele cuantice. Să considerăm de exemplu experimentul corespunzător cu electroni, cunoscut ca experimentul lui Stern-Gerlach, în care *prisma Nicol* este înlocuită printr-un cîmp magnetic neomogen, iar polarizarea, prin orientarea spinului. Și iarăși, ceea ce se poate observa aici, anume numărul electronilor de un spin dat, depinde de instalația experimentală respectivă; această dependență poate fi descrisă spunînd că instrumentul marchează proiecții ale stării de fapt.

Această descriere este valabilă pentru orice efect cuantic. O observație sau o măsurătoare nu se referă la un fenomen al naturii ca atare, ci la un aspect al său, aspectul sub care este considerat într-un anumit sistem de referință, sau la proiecția sa relativă la sistemul de referință, care bineînțeles este format din întreaga aparatură folosită. Dacă utilizăm termeni matematici, cuvântul proiecție este pe deplin justificat, deoarece operația principală este o generalizare directă a proiecției geometrice, numai că acum este vorba de un spațiu cu număr mare de dimensiuni, iar adesea cu o infinitate.

Dacă analizăm faptele de mai sus din punctul de vedere al particulelor, apar acele relații de incertitudine la care nu mă voi opri aici în mod amănunțit, deoarece în prezent ele pot fi găsite în orice manual de mecanică cuantică. Bohr a introdus conceptul de complementaritate pentru a exprima faptul că cunoașterea maximă a unei esențe fizice nu se poate obține printr-o observație unică sau o instalație experimentală unică, ci că sînt necesare diferite instalații experimentale, care se exclud reciproc, dar sînt complementare. În limbajul adoptat aici aceasta ar însemna că cunoașterea maximă poate fi obținută numai printr-un număr suficient de proiecții independente ale uneia și aceleiași esențe fizice, după cum în cazul cartonului circular erau necesare umbre în diferite plane, pentru a-i determina forma și invariantul (raza). Observarea diferitelor umbre pe două plane perpendiculare, pe care am utilizat-o mai sus, pentru lămurirea noțiunii de invariant, dă o idee foarte bună și despre natura ideii de complementaritate. Rezultatul final al unor experimente complementare este un grup de invarianți, caracteristic pentru obiectul respectiv. Invarianții principali se numesc sarcină, masă (mai bine masă de repaus), spin etc., și în fiecare caz în care sîntem în stare să determinăm aceste mărimi conchidem că avem de-a face cu o anumită particulă. Susțin că avem dreptul de a considera aceste particule drept reale, într-un sens care nu diferă în mod substanțial de sensul obișnuit al cuvîntului.

Înainte de a justifica acest punct de vedere, aș vrea să mă refer în cîteva cuvinte la observația, care se repetă adesea, cum că mecanica cuantică a distrus distincția

dintre obiect și subiect, deoarece ea poate să descrie o situație din natură nu ca atare, ci numai ca o situație creată printr-un experiment uman. Aceasta este cu totul adevărat. Fizicianul atomist este mult îndepărtat de atitudinea idilică a cercetătorului de modă veche care spera să pătrundă în tainele naturii, pîndind fluturii în luncă. Observarea fenomenelor atomice pretinde instrumente atît de sensibile, încît trebuie să ținem cont de reacția lor la măsurători ; și deoarece această reacție se supune acelorași legi cuantice ca și particulele observate, apare un coeficient de nesiguranță care exclude previziunea deterministă. De aceea, este zadarnic să ne gîndim la situația care ar avea loc dacă n-ar interveni observatorul, sau care ar fi independentă de el. Dar în ce privește intervenția dată a unui observator într-o situație experimentală dată, apoi mecanica cuantică dă aserțiuni precise cu privire la cunoașterea maximă care se poate obține. Deși noi nu știm totul sau putem numai să ne apropiem de o cunoaștere perfectă, totuși îmbunătățind instrumentele noastre putem obține anumite informații limitate, dar bine conturate, care sînt independente de observator și de instrumentele sale, și anume particularitățile invariante ale unui număr de experimente proiectate într-un mod corespunzător. Procesul prin intermediul căruia obținem această cunoaștere este indubitabil condiționat și de subiectul observator. Dar aceasta nu înseamnă că rezultatele sînt lipsite de realitate. Căci este cu totul evident că experimentatorul, cu instrumentele sale, este o parte a lumii reale, precum sînt reale și procesele de gîndire la proiectarea experimentelor. E drept că granița dintre acțiunea subiectului și reacția obiectului nu este precisă. Dar aceasta nu ne împiedică să folosim aceste concepte într-un mod rezonabil. Doar nu este exact determinată nici granița dintre un lichid și vaporii săi, deoarece atomii se evaporă și se condensează încontinuu, și cu toate acestea putem să vorbim despre lichid și vaporii.

Să revenim acum la problema realității și să prezentăm opiniile unor filosofi contemporani cu privire la ea.

Într-o carte recent apărută, autorul american H. Margenau susține ideea că realitatea ar fi formată din două straturi : din date senzoriale și nemijlocite și din confi-

gurații construite („constructs”) ; acestea din urmă cuprind atît obiectele din viața cotidiană, cît și conceptele științifice, întrucît pot fi verificate prin numeroase experimente independente. Adepții pozitivismului logic, care au pretenția de a poseda unica filozofie științifică exactă, consideră — dacă îi înțeleg eu bine — că („constructs”) sînt numai instrumente conceptuale ale gîndirii, cu ajutorul cărora se pot cuprinde și ordona datele senzoriale grosolane, singurele cărora ei le recunosc caracterul de realitate. Acestea sînt doar variații neesențiale pe aceeași temă, și îmi par lipsite de importanță pentru că subapreciază două momente esențiale privitoare la realitate. Primul constă în aceea că este fals, din punct de vedere psihologic și fiziologic, să considerăm senzațiile nemijlocite ca date primare ; al doilea rezidă în aceea că nu fiecare concept din domeniul „constructelor” științifice are caracter de obiect real, ci numai acele concepte care sînt invariante ai transformărilor ce intră în joc.

În ce privește primul moment, trebuie să ne gîndim la faptul că fiecare ființă umană capătă încă din fragedă copilărie aptitudinea de a distinge și a recunoaște obiectele. De aceea, lumea unei ființe umane normale nu este un caleidoscop de senzații, ci este o arenă de evenimente cu sens și în continuă schimbare, în care diferitele obiecte, în pofida aspectelor lor schimbătoare, își păstrează identitatea. Această însușire a sufletului de a neglija deosebirile dintre impresiile senzoriale și de a observa numai caracterul lor invariant îmi pare a fi faptul cel mai pregnant al structurii noastre psihice.

Închipuiți-vă că vă duceți la plimbare însoțiți de cîinele dumneavoastră. El vede un iepuraș și-l urmărește cu înverșunare ; în curînd, cîinele apare în cîmpul dumneavoastră vizual doar ca o pată mică. Dar dumneavoastră tot timpul îl vedeți pe cîinele dumneavoastră și nici decum un șir de impresii vizuale de mărime tot mai mică.

Psihologia modernă a ținut seama de această situație fundamentală în psihologia gestaltistă (*Gestaltpsychologie*) a lui Köhler, Hornbostel și Wertheimer, pentru a numi doar cîțiva psihologi germani din această școală, pe care îi cunosc personal. Aș vrea să identific cuvîntul *Gestalt*

cu conceptul matematic de invariant și să vorbesc de „invariantul percepției” ca element al lumii noastre psihice. După cât cunosc din fiziologia și anatomia sistemului nervos, din lucrările lui E. D. Adrian și J. Z. Young, rezultatele de aici coincid pe deplin cu cele ale observației psihologice.

Fiecare fibră nervoasă în parte, indiferent dacă este motorie sau senzorială, și în acest caz din urmă, indiferent de faptul dacă transmite mesaje tactile, vizuale, auditive sau termice, transmite un șir de impulsuri regulate, care nu au nici cea mai mică asemănare cu excitația fizică. Creierul nu capătă decât un șir de asemenea impulsuri, fiecare din ele fiind transmis de diferite fibre într-un anumit loc al scoarței cerebrale. Creierul posedă proprietatea uimitoare de a decodifica aproape instantaneu aceste mesaje cifrate. Prin aceasta, el rezolvă o problemă algebrică extrem de dificilă, determinînd formele invariante în haosul semnalelor în continuă schimbare. Acești invarianti determină astfel nu un șir dezordonat de impresii, ci obiecte care se pot recunoaște.

Dacă am încerca să construim o filozofie a științelor naturii, în ipoteza că materialul nostru inițial îl constituie senzațiile neordonate, nu am putea nici măcar să descriem manipulările și instrumentele noastre simple. După cum am mai spus, științele naturii trebuie să accepte conceptele din viața cotidiană și expresiile limbii uzuale. Dar, ele depășesc mult aceste concepte, întrucît folosesc dispozitive de mărire, telescoape, microscopie, amplificatori electronici etc. Întîlnim astfel situații noi, în care practica normală ne lasă în pană, și avem dificultăți în ce privește interpretarea semnalelor recepționate. Veți înțelege ce am în vedere, dacă v-ați uitat vreodată într-un microscop, cu ajutorul căruia un prieten medic v-a arătat celule sau microbi remarcabili; căci, de fapt nu ați văzut nimic decât un haos de linii și culori vagi și n-aveți decât să-l credeți că ceva oval și galben i-a trezit interesul. La fel stau lucrurile în toate ramurile fizicii în care se folosesc instrumente. Aruncăm o privire în necunoscut și sîntem derutați în acest fel; căci în această clipă noi nu mai sîntem copii; am pierdut însușirea de a descifra în mod inconștient mesajele aduse de nervi și trebuie să introducem

tehnica noastră conștientă de gîndire, matematica, cu toate artificiile ei. Excepția o constituie puținele genii ca Faraday, care reușea să vadă conexiunile interne ale naturii cu intuiția unui copil. Aplicăm de aceea analiza, pentru a găsi în șuvoiul de fenomene ceva durabil, adică tocmai invarianții. Așadar, invarianții sînt conceptele despre care știința vorbește așa cum vorbește limba uzuală despre „obiecte“, și cărora le atribuie denumiri ca și cum ar fi obiecte obișnuite.

Firește, ei nu sînt obiecte obișnuite. Cînd spunem că un electron este o particulă, știm foarte bine că nu e totuna cu un grăunte de nisip sau de polen. În anumite condiții, el nu are, de pildă, o individualitate bine determinată : cînd un electron este expulzat dintr-un atom cu ajutorul unui alt electron, nu mai putem deosebi între cei doi electroni în mișcare. Totuși, electronul are anumite proprietăți comune cu ale „particulelor“ obișnuite, ceea ce justifică denumirea sa. Asemenea extinderi ale nomenclaturii sînt uzuale atît în viață, cît și în științele naturii, iar în matematică sînt dezvoltate în mod sistematic. Un număr, de exemplu, înseamnă la origine un număr întreg, cu ajutorul căruia se poate număra un șir de obiecte. Cuvîntul respectiv este utilizat însă și pentru fracții ca $\frac{2}{3}$, rădăcini ca $\sqrt{2}$, numere transcendente ca π sau numere imaginare ca $\sqrt{-1}$, deși cu acestea nu se poate număra. Avem dreptul să facem aceasta, deoarece aceste numere au comun cu numerele întregi anumite proprietăți formale, din ce în ce mai puține, totuși suficiente pentru a folosi pentru ele un cuvînt cunoscut. Același principiu este valabil în geometria analitică, cînd vorbim despre dreapta de la infinit sau despre sfera cvadridimensională. Așa stau lucrurile și în fizică. Vorbim despre lumina infraroșie sau ultravioletă, deși nu le putem vedea, sau despre unde ultrasonore, deși nu le putem auzi. Sîntem atît de obișnuiți să extrapolăm în domeniul situat dincolo de senzațiile noastre, încît nici nu ne mai dăm seama că extindem conceptele dincolo de domeniul lor inițial. Însă întotdeauna urmăm același principiu. Să considerăm conceptul de undă. Undele unei mări le vedem ca reale, deși ele nu au nimic material, ci sînt numai o formă a supra-

feței apei. Este un punct de vedere îndreptățit, deoarece le putem caracteriza prin anumite mărimi invariante, ca frecvența și lungimea de undă, respectiv spectrul lor. Dar același lucru este valabil și pentru undele de lumină. De ce să refuzăm acestora atributul de reale, chiar dacă în teoria cuantelor undele reprezintă doar o distribuție a probabilității? Ceea ce apropie aici de realitate este întotdeauna caracterul invariant al structurii, independent de aspectul de proiecție. Dar acest caracter este comun și pentru viața de toate zilele și pentru științele naturii. Iar această legătură — chiar dacă îndepărtată — dintre lucrurile din viața cotidiană și științele naturii ne silește să utilizăm una și aceeași terminologie. Aceasta este și premisa pentru menținerea unității dintre științele pure ale naturii și știința aplicată.

Bibliografie

1. H. Dingle, în „Natura”, 168 (1951), p. 630, vezi și „Phys. Bl.”, 7 (1951), pp. 481—486, în care acest autor se ocupă de tema: *Noua situație în fizică*.

*Este oare mecanica clasică
într-adevăr deterministă?**

Legile mecanicii clasice și, după chipul lor, cele ale întregii fizici clasice sînt astfel alcătuite, încît cînd se dau variabilele unui sistem închis, într-un anumit moment inițial de timp, atunci ele pot fi calculate pentru orice alt moment de timp — cel puțin în principiu ; căci în majoritatea cazurilor, executarea calculului matematic depășește forțele omului. Această idee deterministă a avut o mare putere de atracție asupra multor gînditori și a devenit o parte esențială a filozofiei științelor naturii. Fizica modernă a fost însă nevoită să părăsească, sub presiunea noilor descoperiri științifice, determinismul și alte teorii tradiționale cu privire la spațiu, timp și materie. Mecanica cuantică, care a luat locul mecanicii lui Newton, permite numai enunțuri statistice despre comportarea particulelor care posedă masă. Majoritatea covîrșitoare a fizicienilor s-au împăcat cu această stare de lucruri, deoarece ea corespunde pe deplin situației empirice din fizica atomică și nucleară, unde experimentele se întemeiază în mod esențial pe numărarea evenimentelor. Printre teoreticieni însă există și dintre aceia care nu se împacă cu situația dată, iar printre ei sînt tocmai unii dintre oamenii mari cărora teoria cuantelor le datorează apariția și dezvoltarea. După cîte știu, însuși Planck a fost întotdeauna sceptic cu privire la interpretarea statistică a mecanicii cuantice. Același lucru este valabil și pentru Einstein ; el n-a renunțat nici pînă astăzi** să demonstreze contradicțiile

* Din „Physikalische Blätter“, 11 (1955), p. 49.

** Acest studiu a fost scris de Max Born înaintea morții lui A. Einstein (N.R.).

acestei interpretări prin exemple rafinate (de altfel, el se ocupă și mai mult de analiza noțiunii de realitate fizică, care este strâns legată de problema determinismului). Schrödinger merge și mai departe: el propune să se renunțe la conceptul de particulă (electroni, nuclee, atomi etc.) și să se construiască întreaga fizică exclusiv pe ideea de undă, care se supune legilor deterministe în conformitate cu mecanica ondulatorie. De Broglie (și alții) ocupă poziția direct opusă; ei resping undele și încearcă o nouă interpretare a mecanicii cuantice, în care, în principiu, totul este determinat, iar nedeterminarea previziunii apare numai din cauza prezenței unor parametri ascunși și inaccesibili observației. Niciunul din acești fizicieni nu neagă că în domeniul în care ea este valabilă (adică făcând abstracție de teoria particulelor elementare) mecanica cuantică concordă cu practica și satisface toate pretențiile experimentatorilor. Refuzul lor se întemeiază în fiecare caz în parte pe afirmația că interpretarea uzuală a formulelor cuantice este lipsită de claritate și filozofic nesatisfăcătoare.

Ce reprezintă însă astăzi această filozofie? Eu nu cred că i se poate pune o dată anterioară lui Galilei și Newton. Desigur, în astronomie erau și înainte previziuni cu privire la constelații și eclipse, dar antichitatea și evul mediu vedeau ordine și determinare doar în sferile cerești, în timp ce pe pământ domnea arbitrarul și haosul. Ideile religioase de soartă și determinare se referă nu la procesele naturii, ci la om și, firește, se deosebesc fundamental de determinismul mecanic, pe care îl avem în vedere aici. Acesta nu poate fi conceput fără legile mișcării ale lui Newton și fără uimitorul lor succes în previziunea evenimentelor cerești. El a rezultat din aceste legi și ulterior, în secolele XVIII și XIX, a devenit crezul fundamental al științei în genere. Remarcabil în acest caz este faptul că mecanica lui Newton e insuficientă pentru explicarea observațiilor, în special în fizica atomică; ea nu mai este suficientă pentru a clătina credința în această idee abstractă.

Dar oare este astăzi sigur că mecanica clasică își permite în adevăr să facă previziuni în toate condițiile? Îndoielile cresc atunci când se compară scara de timp din

astronomie cu cea din fizica atomică. Vîrsta lumii se apreciază la circa 10^9 ani, adică perioade de revoluție ale pămîntului. Numărul perioadelor în starea fundamentală a atomului de hidrogen este de ordinul de mărime $10^{16}/s$. Așadar, dacă măsurăm timpul în unități naturale, situația se prezintă exact invers decît o crede opinia naivă : lumea stelară are o viață scurtă, lumea atomică o viață extrem de lungă. Oare nu este riscant să tragi concluzii din experiența unei lumi cu viață scurtă care să fie valabile și pentru una cu viață lungă ?

Aceste îndoieli se intensifică atunci cînd se consideră teoria cinetică a gazelor. În această teorie se afirmă de obicei că în principiu rezultatul este determinat, iar introducerea considerentelor statistice este necesară numai din cauză că noi ignorăm poziția inițială exactă a unui mare număr de molecule. Eu am fost de mult de părere că prima parte a acestei aserțiuni este foarte dubioasă. Să considerăm cazul simplu al unei molecule sferice mobile care ricoșează elastic în contact cu alte numeroase molecule imobile (un fel de biliard tridimensional). Atunci, o modificare foarte mică în direcția vitezei inițiale va trebui să ducă la modificări mari ale traiectoriei în cursul mișcării în zigzag, deoarece o modificare unghiulară mică provoacă abateri spațiale tot mai mari, și pînă la urmă trebuie să rezulte ca sfera care inițial era lovită, acum să fie ratată. Dacă abaterea inițială e micșorată, atunci momentul cînd traiectoria este înlocuită cu alta se amîină, dar pînă la urmă acest moment survine. Dacă pretendem determinare pentru întregul timp, atunci trebuie să excludem toate abaterile de la direcția inițială, chiar și cele mai mici *. Dar are aceasta vreun sens fizic ? Am convingerea că nu. Și că de fapt sistemele de acest gen sînt mai de grabă nedeterminate. Pentru a demonstra această aserțiune este necesară o înțelegere clară a conceptului de determinare.

În primul rînd, trebuie să facem distincția dintre stabilitate și instabilitatea dinamică. O mișcare se numește

* Evident, aici este vorba de o limită dublă : numărul ciocnirilor tinde către ∞ , modificarea direcției tinde către 0 ; în absența altor date, rezultatul este nedeterminat.

stabilă, dacă o variație mică a stării inițiale Δx_0 , Δv_0 (unde x este totalitatea coordonatelor, iar v totalitatea vitezelor) provoacă numai o modificare redusă a stării finale Δx , Δv astfel încît, pentru orice timp avem $\Delta x < M \Delta x_0$, $\Delta v < M \Delta v_0$, unde M este o constantă avînd ordinul de mărime. În alte cazuri se spune că mișcarea este nestabilă. Este plauzibil că mișcarea sferei în jocul de biliard, pe care l-am discutat mai sus, este nestabilă (cu atît mai mult este valabil acest lucru pentru un gaz care constă din foarte multe particule elastice mobile). S-a discutat mult problema dacă mișcarea planetelor este stabilă sau nu. Nu știu care este rezultatul cercetărilor moderne (teoria celor trei corpuri și teoria a n corpuri); în orice caz, pentru țelurile noastre, acest lucru nu are importanță. Esențial este faptul că există sisteme care servesc în calitate de modele ale proceselor fizice și care în primul rînd rămîn într-un domeniu finit al spațiului și pentru care, în al doilea rînd, toate mișcărilor sînt dinamic nestabile. Modelul gazului care constă din sfere elastice într-o cutie cu pereți elastici este probabil un asemenea sistem, dar e prea complicat pentru o analiză riguroasă. Este suficient să considerăm următorul caz banal de simplu: o particulă cu masă se mișcă fără frecare pe o linie dreaptă (axa x) în absența oricăror forțe și se reflectă elastic la extremități situate în finit ($x = 0$, $x = l$). Coordonata x rămîne într-un interval finit $0 < x < l$ pentru orice stare inițială (x_0, v_0), viteza v rămîne constantă, dar abaterea Δx crește proporțional cu timpul ($\Delta x = \Delta x_0 + t \Delta v_0$) și după un interval suficient de mare de timp atinge valori oricît de mari. Orice mișcare este astfel nestabilă.

Acum devine evidentă legătura cu problema determinismului. Dacă vrem să menținem valabilitatea aserțiunii că și în acest sistem starea inițială determină orice altă stare, atunci sîntem nevoiți să pretindem valori absolute exacte pentru x_0 și v_0 și să interzicem orice abatere $\Delta x_0, \Delta v_0$. Am putea vorbi atunci de o determinare „slabă“, în opoziție cu cazul „tare“, unde toate mișcărilor sînt dinamic stabile și, prin urmare, previziunile sînt cu adevărat posibile. Dar aceasta ar fi doar un mod de a vorbi. Adevărata situație este următoarea: după ce se atinge un punct

critic $t_c = l/\Delta v_0$, nedeterminarea devine $\Delta x > l$, iar punctul material poate fi găsit oriunde în intervalul $0 < x < l$. Cu alte cuvinte, situația finală este nedeterminată. Dacă însă micșorăm Δv_0 , atunci momentul critic t_c este doar deplasat, însă rămîne finit pentru orice Δv_0 finit; t_c devine infinit numai pentru $\Delta v_0 = 0$, adică pentru o viteză inițială determinată absolut exact.

Aici devine evidentă legătura cu problema continuului. Discutarea exhaustivă a acestei chestiuni ne-ar conduce prea departe. Este suficientă următoarea scurtă observație: enunțuri ca „o mărime x are o valoare bine determinată” (exprimată printr-un număr real și reprezentată printr-un punct al continuului matematic) mi se par lipsite de orice sens fizic. Fizica modernă a obținut succesele ei uriașe cu ajutorul principiului metodologic după care conceptele a căror utilizare pretinde distincții care în principiu nu pot fi observate sînt lipsite de sens și trebuie să fie eliminate. Exemplul cel mai convingător îl constituie teoria relativității restrînsă și teoria relativității generale, ale lui Einstein (prima respinge conceptul de simultaneitate absolută, iar a doua, distincția dintre gravitație și accelerație, ca fiind inaccesibilă observației) și crearea de către Heisenberg a mecanicii cuantice (în care din teoria atomului lui Bohr se elimină razele și frecvențele neobservabile). Problema continuității pretinde folosirea aceluiași principiu. Un enunț ca $x = \pi$ cm ar avea sens numai dacă l-am putea distinge de $x = \pi_n$ cm, unde π_n ar fi aproximarea lui π cu ajutorul primelor n zecimale exacte, și aceasta pentru orice n . Dar aceasta nu este posibil; și chiar dacă presupunem că în viitor exactitatea măsurărilor va crește, totdeauna se va putea alege un n atît de mare încît distincția experimentală să devină imposibilă.

Evident, nu am intenția de a înlătura din fizică conceptul de număr real. El este necesar pentru aplicarea analizei. Cred însă că o situație fizică trebuie să fie descrisă cu ajutorul numerelor reale astfel, încît în toate observațiile să se țină seama de imprecizia naturală.

Încă acum 50 de ani, Felix Klein a cerut să se facă în geometrie un asemenea pas. El dorea ca alături de geometria abstractă, exactă, să existe o geometrie practică, în care locul punctului să-l ia o pată mică, locul dreptei, o

bandă îngustă ș.a.m.d. Însă din aceasta n-a ieșit nimic. Între timp, fizica a elaborat în mod independent aparatul necesar, și anume statistica fizică. Aserțiunea „ x este egal cu un număr real” este înlocuită cu următoarea: „Probabilitatea ca x să se afle în intervalul $x_1 < x < x_2$ este $P(x_1|x|x_2)$ ”. Aici x , x_1 , x_2 , P pot fi considerate ca numere reale, deoarece analitic acest lucru este comod cît timp nu se pune problema măsurării exacte a mărimilor; doar P reprezintă aproximația rezultatului așteptat, cînd se numără cazurile care sînt mărginite de valorile aproximative x_1 , x_2 . Cu alte cuvinte, adevărata variabilă fizică este densitatea de probabilitate $P(x)$.

Mecanica cuantică a recunoscut că aceasta este unica descriere corectă și posibilă a situațiilor fizice (însă prin introducerea amplitudinilor probabiliste ea depășește mult acest punct de vedere statistic).

În mecanica clasică, metoda statistică este folosită numai pentru sistemele formate dintr-un număr foarte mare de particule. Modelul nostru arată că aceasta trebuie utilizată în toate cazurile, chiar în cazul unei singure particule, în condițiile cele mai simple ce se pot concepe. Aceasta nu pretinde considerente matematice noi; căci legea după care se modifică densitatea de probabilitate este dată direct de teorema lui Liouville, din mecanică¹. Despre amănuntele matematice și legătura cu mecanica cuantică am vorbit mai pe larg în alt loc². Aici vreau numai să comunic pe scurt unele rezultate.

Dacă rămînem la început în cadrul mecanicii clasice, constatăm că modelul nostru este probabil exemplul cel mai simplu pentru așa-numita ipoteză ergodică din mecanica statistică. Se poate arăta cu mijloacele cele mai simple că o distribuție probabilistă inițială, care descrie o stare aproape exactă, trece cu timpul în așa-numita distribuție microcanonică. Lucrurile stau astfel chiar în cazul *unei singure particule* și n-au nimic de-a face cu „un număr mare” de particule. Sistemele complicate cu schimb energetic trebuie luate în considerație numai dacă vrem să trecem la distribuția canonică.

¹ Vezi appendicele de la acest capitol.

² „Kgl. Dan. Akad. d. Wiss, Math.-phys. Abt.”, 30 (1955), Abh. 2.

Acum, același model poate fi tratat și cu ajutorul mecanicii cuantice. O stare inițială cu nedeterminarea Δx_0 a poziției inițiale este descrisă atunci de un pachet de unde; nedeterminarea Δv_0 a vitezei inițiale nu poate fi luată arbitrar, ea fiind legată de Δx_0 prin relația de incertitudine a lui Heisenberg, $\Delta x_0 \cdot \Delta v_0 > h/2m$, care rămîne valabilă pentru orice timp, iar factorii Δx și Δv se modifică cu timpul. Dacă atît Δx_0 cît și Δv_0 pot fi micșorați (pentru mase mari), formulele cuantice devin identice cu cele clasice într-o bună aproximație, și din nou apare momentul critic t_c , cînd mișcarea individuală încetează și apare o stare care poate fi descrisă doar statistic. Aceasta corespunde întru totul cu descrierea obișnuită a mișcării în mecanica cuantică prin intermediul undelor staționare, care reprezintă astfel un analog al distribuției clasice microcanonice.

Rezumînd, putem spune: nu introducerea descrierii nedeterminate, statistice, deosebește mecanica cuantică de cea clasică, ci alte trăsături, în primul rînd concepția densității de probabilitate ca pătrat al unei amplitudini de probabilitate, $P = |\Psi|^2$; astfel apare fenomenul de interferență a probabilităților; acesta face imposibilă aplicarea concepției naive despre obiect la particulele cu masă din fizică și ne constrînge la o revizuire a conceptului de realitate fizică. Dar aceasta depășește cadrul acestor observații elementare.

APENDICE

Teorema lui Liouville exprimă conservarea densității de probabilitate în timpul mișcării și conduce la ecuația diferențială

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \frac{\partial P}{\partial p} - \frac{\partial H}{\partial p} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1)$$

unde H este funcția lui Hamilton (expresia din membrul drept este așa-numita paranteză a lui Poisson). Soluția corespunzătoare stării inițiale $P(x, p, 0) = F(x, p)$ este

$$P(x, p, t) = F[f(x, p, t), g(x, p, t)], \quad (2)$$

unde $f(x, p, t) = \text{const.}$, $g(x, p, t) = \text{const.}$ sînt două integrale ale ecuațiilor canonice ale mișcării normalizate astfel încît

$$f(x, p, 0) = x, g(x, p, 0) = p. \quad (3)$$

Așadar, soluțiile ecuației probabilităților (1) și ale ecuațiilor canonice sînt probleme întru totul echivalente. Totuși, soluția lui (1) furnizează rezultate noi și interesante.

În cazul exemplului considerat în text avem $H = p^2/2m$: astfel încît (1) devine

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -v \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \left(v = \frac{p}{m}\right) \quad (4)$$

Două integrale normalizate sînt $f = x - vt$, $g = v$, deci soluția lui (2) este

$$P = F(x - vt, v). \quad (5)$$

Condițiile limită se reduc la cerința de periodicitate a lui x (de perioadă $2l$) și de antisimetrie a lui x și v :

$$\begin{aligned} F(x + 2l, v) &= F(x, v), \\ F(-x, -v) &= F(x, v). \end{aligned} \quad (6)$$

Ele pot fi satisfăcute cu ajutorul unei funcții arbitrare $f(x, v)$ punînd:

$$F(x, v) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [f(2kl + x, v) + f(2kl - x, -v)]. \quad (7)$$

Dacă înlocuim aici x cu $x - vt$ atunci, conform cu (5), obținem $P(x, v, t)$. Dacă în momentul inițial poziția și viteza sînt determinate, atunci $f(x, v)$ trebuie să fie considerată ca o funcție ce are un maxim pronunțat pentru x_0, v_0 și devine infinit mică în toate celelalte puncte. Dacă f este o funcție a lui Gauss atît în x (de lățime σ_0) cît și în v (de lățime τ_0) atunci distribuția lui x care rezultă

$$P(x, t) = \int P(x, v, t) dv \quad (8)$$

este iarăși o sumă de funcții Gauss în x cu lățimea

$$\sigma(t) = \sqrt{\sigma_0^2 + \tau_0^2 t^2}, \quad (9)$$

care pentru valori mari ale lui t crește proporțional cu t .

Această trecere la limită, $t \rightarrow \infty$, se poate descrie simplu, desenînd un mic cerc în jurul punctului v_0, x_0 din spațiul fazelor (x, p) (sau planul x, v și urmărind cum se descompune el în două elipse de arie egală, avînd centrele în $x_0 \pm v_0 t$, la care axele mari devin tot mai paralele cu axa x și în final mai lungi decît intervalul l .

*Amintiri astronomice**

Nu sînt astronom și nici în fizică n-am făcut vreo lucrare care să se poată aplica la astronomie. Totuși, nu pot rezista tentației de a mă asocia celor care îl felicită pe profesorul Stratton prin articolele cuprinse în acest volum. În viața mea a fost o perioadă cînd eram cît pe ce să mă consacru astronomiei. Dar încercarea a eșuat. De aceea, în locul unei contribuții serioase, doresc să povestesc cum m-am ocupat cu astronomia precum și cîteva amintiri cu privire la astronomii remarcabili, care au fost profesorii mei.

Încep cu profesorul Franz, care era directorul Observatorului din Breslau, orașul meu natal. Tatăl meu, care murise cu puțin înainte de a-mi fi terminat școala, îmi dăduse sfatul să frecventez prelegeri din diferite domenii înainte de a alege o profesiune sau alta. Pe vremea aceea se putea proceda astfel în Germania, datorită deplinei libertăți academice din universități.

Majoritatea obiectelor nu aveau un program precis de studii, nu exista nici un control al frecvenței și nici examene, în afară de cele de absolvire. Fiecare student putea alege prelegerile care îi plăceau cel mai mult; el singur purta răspunderea de a-și fi însușit suficiente cunoștințe pentru examenul de absolvire, care-i dădea dreptul de a exercita o anumită profesiune sau dreptul la un titlu de doctorat. De aceea, mi-am făcut în primul an un program

* Extras din *Uistas in Astronomy*, vol. I, editat de A. Bee (Pergamon Press, London and New York, 1955) în legătură cu 70-a aniversare a profesorului F. J. M. Stratton.

destul de amestecat, și anume fizică, chimie, zoologie, filozofie și logică, matematică și astronomie. În școală, matematica nu m-a interesat niciodată, dar la universitate singurele prelegeri care îmi procurau într-adevăr bucurie erau cele de matematică și astronomie. Cursurile de filozofie au constituit o mare decepție; acolo audiam de toate, cu privire la regulile gândirii raționale, cu privire la paradoxurile spațiului, timpului, substanței și cauzalității, cu privire la structura lumii și la infinit. Toate acestea mi se păreau cumplit de încurcate. Totuși, aceleași concepte apăreau și în prelegerile de matematică și astronomie; dar acolo ele nu erau învăluite de negura paradoxurilor, ci formulate clar, corespunzător cu condițiile date. Cea mai mare descoperire pe care am făcut-o atunci a fost aceea că toate cuvintele mari care au de-a face cu conceptul de infinit nu semnifică nimic, dacă nu sînt legate de un anumit sistem de idei și de o anumită problemă.

Astronomia mă atrăgea prin altceva. Problemele de cosmologie sînt legate de infinitatea universului fizic. Dar în prelegerile sale elementare, profesorul Franz atingea prea puțin din aceste probleme mari. Noi trebuia să învățăm folosirea corectă a instrumentelor, citirea exactă a datelor, evitarea erorilor de observație și deprinderea cu calculul numeric, întregul arsenal al omului de știință care se ocupă cu măsurători. A fost o școală aspră, de exactitate, și mi-a plăcut. Îmi dădea o senzație de teren solid sub picioare; dar de fapt, această senzație nu era justificată de practica astronomică. Observatorul din Breslau nu era situat pe un teren solid, ci pe coama acoperișului înalt și abrupt al clădirii vechi și frumoase a universității; era un turnuleț împodobit cu ornamente fantastice, în stil baroc, și statui ale sfinților și îngerilor. Instrumentul cel mai bun era cercul meridian, pe care îl folosisese marele Bessel cu 100 de ani înainte; deși era fixat pe un stîlp rigid, care se ridica din temelia clădirii pînă la acoperiș, el nu era cu totul scutit de vibrațiile provocate de furtunile ce veneau din cîmpia poloneză. Întregul utilaj al acestui observator era învechit, și mai curînd romantic decît practic utilizabil. Existau cîteva telescoape vechi, de pe vremea lui Wallenstein, asemănătoare cu cele pe care le utiliza Kepler. Nu aveam la dispoziție un cronograf electric, și în-

vătam cum se poate măsura pasajul stelelor care apăreau în câmpul vizual al firelor reticulare numărînd bătăile de secundă ale unui ceas mare la care trebuia să estimăm noi zecimile de secundă. Cu toate acestea a fost o minunată școală a științei de a observa, avînd pe deasupra și atracția unei profesii vechi și onorabile.

Îmi amintesc multe nopți reci de iarnă pe care le-am petrecut acolo în micul pavilion de pe acoperiș. Eram doar trei studenți la astronomie și observațiile le făceam pe rînd. Cînd terminam partea mea, mă rezemam de parapet și priveam cu plăcere în jos, spre întinderea largă a frontoanelor și acoperișurilor acoperite cu zăpadă ale orașului vechi, spre siluetele turnurilor masive ale bisericilor din jurul pieții și ale domului, care se desenau pe fondul cerului înstelat, departe, dincolo de rîu. Acolo, în balconul strîmt, în mijlocul sfinților de ghips și al telescoapelor străvechi, nu te puteai elibera de sentimentul de a fi, ca un fel de *famulus* al doctorului Faust. Și nimeni nu s-ar fi mirat dacă dintr-o coloană apropiată ar fi apărut de-o dată Mefistofel. Dar nu era decît bătrînul și bunul profesor Franz, care urca scările pentru a vedea de cei trei studenți ai săi — atîția nu mai avusese de mult — și pentru a examina și critica rezultatele noastre cu chibzuința cercetătorului în științe exaote, plin de grijă și de ironie amicală.

Din păcate, aceste rezultate ale noastre nu erau prea certe ; nu atît din vina noastră, cît din cauza poziției ridicate, dar mult prea expuse, a observatorului. Din acest motiv, profesorul Franz renunțase el însuși la cercetări care pretindeau măsurători exacte și se limita la lucrări descriptive, și anume, la studiul amănunțit al suprafeței lunare, pe care o cunoștea mult mai bine decît geografia terestră. Pe lîngă aceasta, el a depus, ce-i drept, eforturi mari pentru a obține un observator modern, dar totdeauna fără succes. În perioada anilor mei de studenție erau mari speranțe că aceste eforturi vor fi încununate de succes. Firma Carl Zeiss din Jena trimisese un număr de instrumente moderne la expoziția universală din Chicago. După încheierea expoziției, statul prusac le-a achiziționat pentru observatoarele sale universitare. Breslau a căpătat un instrument meridian minunat și un telescop paralactic mare, dar nu s-a acordat o clădire modernă corespunzătoare.

Cercul meridian a fost instalat într-o căsuță de lemn, pe o insulă mică de pe Oder, exact în fața clădirii universității. Această insuliță era în realitate un baraj artificial între râu și o ecluză, prin care treceau de obicei multe șle-puri. Serviciul orei exacte în provincia Silezia, care de decenii se făcea cu ajutorul vechiului cerc din Bessel a fost transmis acum noilor instrumente Zeiss, dar rezultatele rămîneau în cel mai înalt grad nesatisfăcătoare. După un timp considerabil, am descoperit o corelație între neregularitățile ciudate ale observațiilor cu privire la ora exactă și modificările nivelului apei în ecluză; mica insulă suferea mici deplasări, din cauza presiunii apei. Speranțele profesorului Franz cu privire la un loc utilizabil de observație au fost din nou spulberate.

Pentru noi, tinerii, această decepție a fost doar un episod comic. În orice caz, atracția pe care o exercita asupra mea astronomia nu a slăbit prin aceasta. Numai cînd au venit grozăviile calculului astronomic, atunci această atracție a scăzut și pînă la urmă a dispărut. Franz a ținut o prelegere despre determinarea orbitelor planetelor și a dat exerciții practice în cadrul cărora trebuia să învățăm tehnica calculului. Aveam de completat coloane nesfîrșite cu logaritmi cu șapte zecimale ai funcțiilor trigonometrice, în conformitate cu exemplele tradiționale. Știam încă de pe vremea școlii că sînt un calculator prost. Dar mă străduiam cu încăpăținare să mă îndrept, însă fără nici un succes. Mereu, undeva, în cifrele mele apărea cîte o eroare, și rezultatele mele se deosebeau de cele ale camarazilor mei. Ei glumeau pe socoteala mea, și aceasta înrăutățea situația. Nu-mi amintesc să fi încheiat vreodată calculul unei orbite sau al unei efemeride, și pînă la urmă am renunțat nu numai la activitatea de calculator, dar la întreaga idee de a deveni astronom. Dacă aș fi știut pe atunci că există și o altă astronomie, al cărei scop final nu este precizarea pozițiilor planetelor, ci studierea structurii fizice a universului cu ajutorul puternicelor mijloace ale fizicii moderne, poate că ași fi luat o altă decizie. Dar cu astrofizica am luat contact numai peste cîțiva ani, cînd era de acum prea tîrziu să-mi modific planurile.

Pe vremea aceea era uzual ca studenții germani să treacă de la o universitate la alta, dintr-un motiv sau al-

tul. Uneori, era atracția unui profesor renumit sau a unui laborator bine înzestrat ; în alte cazuri, erau plăcerile sau frumusețea unui oraș, muzeele sale, concertele, teatrul sau sporturile de iarnă, carnavalul precum și viața și activitatea veselă în general. În acest fel mi-am petrecut două semestre de vară la Heidelberg și la Zürich, revenind de fiecare dată în iarnă la universitatea din locul meu natal. Observatorul din Heidelberg era pe Königstuhl, unde astronomii trăiau pe dealul lor împădurit o viață închisă și ruptă de „plebe“. Pe atunci mi-am modificat în mod definitiv alegerea în favoarea fizicii și nici măcar renumitul nume al profesorului Wolf, care descoperise mai mulți planetoizi decât oricine altul, nu putea să mă abată de la drumul meu.

Observatorul de la Zürich — mai accesibil — era condus de profesorul Wolfer, un nume comparativ cu cel al profesorului de la Heidelberg. Dar nici măcar aceasta nu m-a tentat.

În vara următoare am plecat la Göttingen și am rămas acolo pînă la încheierea studiilor mele. Karl Schwarzschild era acolo directorul unui observator renumit, la care a activat de-a lungul multor ani marele Gauss. Schwarzschild era cel mai tânăr profesor din universitate, în vîrstă de vreo 30 de ani, mic de statură, cu părul și mustață de culoare închisă, cu ochi scînteietori și un surîs amical, de neuitat. Am urmat seminarul său de astrofizică și am cunoscut acolo pentru prima dată concepția fizică modernă a astronomiei. Am discutat, printre altele, atmosferele planetelor și a trebuit să prezint un referat cu privire la pierderea gazelor în spațiul interstelar, din cauza difuziei care are loc împotriva gravitației. În acest fel, am fost nevoit să studiez minuțios teoria cinetică a gazelor, care pe atunci, în anul 1904, încă nu era parte integrantă a programului de fizică. Dar acesta n-a fost singurul domeniu pe care l-am cunoscut datorită lui Schwarzschild. El avea o minte mobilă, suplă, și astronomia era propriu-zis numai unul dintre domeniile speciale, printre multe altele, care îl atrăgeau. În perioada aceea el publică cercetări profunde cu privire la electrodinamică, în special cu privire la principiul variațional, din care se pot obține ecuațiile lui Lorentz pentru câmpul electronului și mișcarea lui. În anul

următor (1905), au apărut primele din memoriile sale ample cu privire la optica geometrică și erorile instrumentelor optice ; după părerea mea, acestea sînt cercetări clasice pe care nici o lucrare ulterioară nu le-a depășit în claritate și vigoare. Am prezentat metoda lui Schwarzschild în cartea mea de optică (Springer, 1932) și ea va sta la baza ediției modernizate, care va apare în curînd (în colaborare cu dr. E. Wolf) în limba engleză la Pergamon Press London. Schwarzschild și-a aplicat formula pentru aberații la construcția reală a unor noi tipuri de sisteme optice ; eu nu mă simt totuși suficient de competent pentru a spune ceva în legătură cu această latură a activității sale. Tot așa de puțin aș putea discuta lucrările sale de astronomie (experimentală și teoretică). În ce privește persoana sa, el a fost un om foarte prietenos. Totdeauna în bună dispoziție, amuzant, ușor sarcastic, dar binevoitor, și totdeauna gata să sară în ajutor. O dată m-a ajutat să ies dintr-o situație dificilă. Aveam intenția, pentru a obține titlul de doctor, să aleg geometria ca o specialitate auxiliară pentru examenul oral. Prelegerile de geometrie ale lui Felix Klein, „marele Felix“, cum îl numeam noi, nu erau însă pe gustul meu și nu le frecventam prea regulat. Merită să fie remarcat că ochiului atent al lui Klein nu i-a scăpat de loc faptul că trăgeam chiulul de la ore, și el mi-a exprimat clar nemulțumirea sa. Căderea mea la examenul oral, care urma să aibă loc peste numai șase luni, părea inevitabilă. În această situație grea m-am adresat lui Schwarzschild, pentru a-i cere un sfat, și el mi-a spus că o jumătate de an ar fi suficient pentru a învăța întreaga astronomie. Mi-a dat de citit cîteva cărți și mi-a dat și cîteva lecții particulare, în schimbul cărora l-am antrenat la tenis. Astfel, am ajuns la dînsul la examen și prima sa întrebare a fost : „Ce faceți cînd vedeți o stea căzătoare?“ la care am răspuns îndată : „îmi formulez o dorință“, după vechea superstiție germană că o asemenea dorință este totdeauna satisfăcută. Schwarzschild și-a păstrat întreaga seriozitate și continuă liniștit : „Foarte bine, și ce faceți apoi ?“, după care am dat răspunsul așteptat : „Mă uit la ceas, notez timpul, determin constelația din care a provenit, direcția mișcării, lungimea traiectoriei luminoase etc., apoi mă duc acasă și elaborez o orbită aproximativă“.

Aceasta m-a condus la mecanica cerească, și sfârșitul a fost un rezultat bun la trecerea examenului.

Schwarzschild se deosebea de tipul obișnuit al savanților germani venerabili și bărboși din acea vreme. Și anume, nu numai prin exteriorul său — el nu avea decât mustăți —, ci și prin structura sa psihică, care era întrutotul modernă, activă, orientată spre toate problemele zilei. Totuși, avea și el orele sale de împrăștiere profesorală. Noi aveam o masă rezervată într-un anumit colț al unui restaurant, unde se întâlneau de obicei la prînz, un grup de profesori tineri și privat-docenți. Schwarzschild făcea parte din acest grup, pînă la căsătorie. La cîteva săptămîni după căsătorie, se așează o dată la locul său obișnuit de la masa de prînz și se adînci, în modul obișnuit, într-o discuție vie cu privire la probleme științifice, pînă ce unul dintre noi îl întrebă : „Ei, Schwarzschild, cum vă place viața de familie ?” Sîngele i se urcă în obraji, sări în sus și spuse : „Viața de familie, vai, dar am uitat cu totul” ; întinse mîna după pălărie și plecă grăbit. Dar mi se pare că o asemenea comportare nu era tipică pentru el. În general, el știa exact ce face. Viața lui a fost scurtă, realizările sale uimitoare, succesul său a fost mare, iar sfârșitul a fost tragic. După izbucnirea marelui război din anii 1914—1918 aptitudinile sale matematice au fost utilizate, fiind repartizat la statul-major al unei armate de pe frontul răsăritean, pentru a rezolva probleme de balistică. Acolo, în Rusia, el se îmbolnăvi de o boală infecțioasă rară. Se spune că el s-a opus să fie trimis acasă, pînă ce a fost prea tîrziu. La reîntoarcerea spre Göttingen, el m-a vizitat în biroul meu de la autoritățile militare din Berlin. Tot mai era voios, dar arăta foarte, foarte bolnav. În curînd muri. Astăzi, fiul său Martin continuă tradiția astronomică a tatălui și poate deveni astfel al doilea reprezentant al uneia dintre acele dinastii astronomice pe care le ilustrează vestitele dinastii Herschel și Struve.

Am făcut cunoștință cu mulți alți astronomi eminenți, și pe unii i-am cunoscut îndeaproape. Dar, deoarece ei rătăcesc încă pe acest pămînt, este mai bine să mă abțin de a povesti istorioare despre ei.

*Interpretarea statistică
a mecanicii cuantice**

Lucrările pentru care mi-a revenit cinstea Premiului Nobel pentru anul 1954 nu conțin vreo descoperire a unui fenomen nou al naturii, ci fundamentarea unei concepții noi cu privire la fenomenele naturii. Această concepție s-a impus în așa măsură în fizica experimentală și teoretică, încât pare aproape imposibil să mai spui ceva în această privință care să nu fi fost spus deja în repetate rînduri. Și totuși, există anumite aspecte speciale pe care aș vrea să le discut cu această ocazie atît de festivă pentru mine. Primul punct este următorul : lucrările Școlii de la Göttingen, pe care le-am condus pe atunci, în anii 1926 și 1927, au contribuit la rezolvarea crizei intelectuale care a cuprins știința noastră datorită descoperirii de către Planck a cuanței de acțiune în anul 1900. În prezent, fizica trece printr-o criză asemănătoare : nu am în vedere aici implicațiile ei politice și economice determinate de stăpînirea unei noi și teribile forțe a naturii, ci mă refer la problemele de logică și epistemologie pe care le pune fizica nucleară. Poate că e bine într-un asemenea moment să amintim ce s-a întîmplat înainte într-o situație asemănătoare, mai ales că aceste evenimente n-au fost lipsite de unele elemente dramatice.

În al doilea rînd, a spune că fizicienii adoptaseră felul de a gîndi elaborat de noi pe atunci, nu este cu totul exact; există cîteva excepții cu totul remarcabile, și încă printre persoanele care au contribuit cel mai mult la edificarea

* Cuvîntare ținută la 11 decembrie 1954 cu prilejul decernării Premiului Nobel. Publicat în „Les Prix Nobel en 1954”, Stockholm 1955, p. 79.

teoriei cuantelor. Însuși Planck a făcut parte din rîndul scepticilor pînă la moarte. Einstein, De Broglie și Schrödinger n-au încetat să sublinieze caracterul nesatisfăcător al interpretării statistice a mecanicii cuantice, să propună revenirea la reprezentările fizicii clasice, newtoniene, și să caute căi care să facă posibil acest lucru, fără a contrazice datele experimentale. Voci atît de importante nu pot fi trecute sub tăcere. Niels Bohr și-a dat multă osteneală pentru a respinge obiecțiile. Și eu m-am gîndit mult la ele și cred că pot contribui cu ceva la clarificarea situației. Aici este vorba de punctele de întretăiere dintre fizică și filozofie. Astfel încît, expunerea mea de fizică va avea o coloratură, în parte istorică, în parte filozofică, și vă rog să priviți acest lucru cu indulgență.

Înainte de toate vreau să arăt cum au apărut mecanica cuantică și interpretarea ei statistică. La începutul anilor douăzeci, desigur că fiecare fizician era convins de valabilitatea ipotezei cuantice a lui Planck, conform căreia, în procesele oscilatorii de o anumită frecvență ν (ca, de exemplu, în undele luminoase), energia apare sub forma unor cuante finite de mărimea $h\nu$. Numeroase experimente puteau fi explicate astfel și ele furnizau întotdeauna aceeași valoare a constantei lui Planck h . Mai mult, și aserțiunea lui Einstein cum că cuantei de lumină i-ar reveni un impuls de mărimea $h\nu/c$ (unde c este viteza luminii) era bine justificată experimental (de exemplu, prin efectul Compton). Aceasta însemna renașterea teoriei corpusculare a luminii pentru un anumit complex de fenomene. Alte procese țineau de teoria ondulatorie. Fizicienii se obișnuiseră cu această dualitate și învățaseră oarecum s-o mînuiască.

În anul 1913, Niels Bohr a rezolvat enigma spectrelor liniare, aplicînd teoria cuantelor și lămurind în linii mari uimitoarea stabilitate a atomilor, structura învelișurilor electronice și sistemul periodic al elementelor. Pentru cele ce urmează, teza cea mai importantă a teoriei sale era următoarea: un sistem atomic nu poate să existe în toate stările mecanice posibile, care formează un continuu, ci numai într-un șir de stări discrete, „staționare”; cînd se trece de la o stare la alta, diferența de energie $E_n - E_m$ este emisă sau absorbită (după cum E_n este mai mare sau mai

mic decât E_n) sub forma cuantei de lumină $h\nu_{mn}$. Această este o interpretare energetică a legii fundamentale din spectroscopie, pe care o descoperise W. Ritz cu câțiva ani înainte. Situația poate fi prezentată intuitiv, dacă nivelele energetice ale stărilor staționare sînt inserate de două ori, orizontal și vertical; atunci se formează schema pătratică

	E_1	E_2	E_3	...
E_1	11	12	13	—
E_2	21	22	23	—
E_3	31	32	33	—
$\vdots$	—	—	—	—

în care locurile de pe diagonală corespund stărilor, iar celelalte corespund trecerilor.

Pentru Bohr era foarte clar că legea astfel formulată contrazice mecanica și că, prin urmare, însăși utilizarea noțiunii de energie într-un asemenea context este problematică. Îndrăzneța contopire a vechiului cu noul el o justifică prin principiul său de corespondență. Aceasta este cererea firească ca în cazul-limită, cînd numerele legate de stările staționare — așa-numitele numere cuantice — sînt foarte mari (adică atunci cînd ele se află departe, la dreapta și în josul schemei de mai sus) și energia se modifică relativ puțin din loc în loc, adică practic în mod continuu, mecanica clasică uzuală să fie valabilă cu o mare aproximație.

Fizica teoretică a trăit cu această idee următorii zece ani. Problema era următoarea: o oscilație armonică are nu numai o frecvență, ci și o intensitate. Pentru fiecare trecere din schemă trebuie să existe o intensitate corespunzătoare; cum poate fi ea găsită cu ajutorul principiului corespondenței? Problema consta în a ghici necunoscutul pe baza cunoașterii unui caz-limită. Succese considerabile au fost obținute de către Bohr însuși, de către Kramers, Sommerfeld, Epstein și mulți alții. Dar pasul decisiv a fost din nou realizat de către Einstein, care printr-o nouă derivare a formulei radiației, a lui Planck, a arătat în mod clar că conceptul clasic de intensitate a radiației trebuie înlocuit prin conceptul statistic de probabilitate de trecere: fiecăru-i loc din schema noastră i se atașează [alături de frec-

vență $v_{mn} = (E_n - E_m)/h$] o anumită probabilitate de trecere, în cazurile de emisiune sau absorbție a radiației.

Și noi, la Göttingen, am participat la încercările de a extrage din rezultatele experimentale necunoscuta mecanică atomică. Dificultatea logică devenea tot mai acută. Cercetările cu privire la difuzia și dispersia luminii arătau că interpretarea lui Einstein a probabilității de trecere, ca măsură a tăriei unei oscilații, nu era suficientă și că nu ne puteam lipsi de ideea că amplitudinea oscilației este legată de fiecare trecere. În această privință, sînt de amintit lucrările lui Ladenburg [1], Kramers [2], Heisenberg [3], ale lui Jordan, împreună cu mine [4]. Arta de a ghici formulele juste, care se deosebesc de cele clasice, dar trec în ele în sensul principiului corespondenței, a fost perfecționată considerabil. O lucrare de-a mea, în titlul căreia expresia de „mecanică cuantică” este introdusă pentru prima oară, conține o formulă foarte complicată, valabilă și astăzi, pentru perturbarea mutuală a sistemelor atomice.

Heisenberg [5], care pe atunci era asistentul meu, a pus brusc capăt acestei perioade. El a tăiat nodul gordian cu ajutorul unui principiu filozofic și a înlocuit ghicitul printr-o regulă matematică. Principiul său spune că în descrierea teoretică nu trebuie folosite conceptele și reprezentările care nu corespund unor stări de fapt ce se pot observa fizic. Cînd Einstein, în fundamentarea teoriei sale a relativității, elimina conceptele de viteză absolută a unui corp și de simultaneitate absolută a două evenimente în poziții spațiale diferite, el aplica același principiu. Heisenberg a proscris reprezentările de orbită electronică cu raze și perioade de revoluție determinate, deoarece aceste mărimi nu sînt observabile, și a cerut ca teoria să fie construită cu ajutorul schemelor pătratice de tipul celei indicate mai sus. În loc să se descrie mișcarea prin coordonata dată ca funcție de timp $x(t)$, trebuie să se determine tabela probabilităților de trecere x_{mn} . Mi se pare că principiul decisiv din lucrarea sa (p. 881) este cerința cu privire la necesitatea de a găsi o regulă care, pornind de la o schemă dată

$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots \\ x_{21} & x_{22} & \dots \end{bmatrix}$	să permită aflarea schemei pătratelor	$\begin{bmatrix} (x^2)_{11} & (x^2)_{12} & \dots \\ (x^2)_{21} & (x^2)_{22} & \dots \end{bmatrix}$
--	--	--

(sau, mai general, regula de înmulțire pentru asemenea scheme).

Cu ajutorul examinării unor exemple cunoscute, găsite pe baza unor presupuneri, el a stabilit această regulă și a aplicat-o cu succes la cazuri simple, cum ar fi oscilatorul armonic și cel nearmonic.

Aceasta s-a întâmplat în vara anului 1925. Heisenberg, care suferea mult de o alergie la fîn, și-a luat concediu, pentru a face o cură la mare, și mi-a predat lucrarea sa spre a o publica în caz că voi considera că din aceasta poate ieși ceva.

Mi-am dat seama imediat de importanța acestei idei și am trimis manuscrisul la „Zeitschrift für Physik“. Regula de înmulțire a lui Heisenberg nu m-a lăsat în pace, și după opt zile de meditații și încercări intense mi-am amintit dintr-o dată de o teorie algebrică pe care o învățasem la Breslau de la dascălul meu, profesorul Rosanes. Matematicienilor, asemenea scheme pătratice le sînt bine cunoscute, și asociate cu o anumită regulă de înmulțire ei le denumesc matrice. Am aplicat această regulă la condiția cuantică a lui Heisenberg și am găsit că ea coincide cu mărimile care se află pe diagonală. Era deci ușor de ghicit că celelalte mărimi trebuiau să fie nule; îndată a apărut în fața mea curioasa formulă

$$pq - qp = h/2\pi i.$$

Aceasta însemna că coordonatele q și impulsurile p nu trebuie reprezentate prin valori numerice, ci prin simboluri al căror produs depinde de ordine, adică, după cum se spune, nu este comutativ.

Acest rezultat m-a emoționat, așa cum îl emoționează pe un marinar, după o lungă călătorie, vederea de departe a țărmului dorit. Și singurul lucru pe care îl regretam era că Heisenberg nu era prezent. Din prima clipă am fost convins că am nimerit adevărul. Și totuși, din nou o mare parte era numai ghicită, și anume anularea elementelor nedigonale din expresia de mai sus. Atunci am obținut colaborarea elevului meu Pascual Jordan și în cîteva zile am reușit să arătăm că ghicisem bine. Lucrarea comună, a lui Jordan și a mea [6], conține principiile cele mai im-

portante ale mecanicii cuantice, inclusiv extinderea ei la electrodinamică. Urmă o perioadă febrilă de lungă durată, de colaborare în trei, îngreuiată de absența lui Heisenberg. A urinat un viu schimb de scrisori ; din păcate, partea mea s-a pierdut din cauza dezordinilor politice. Rezultatul a fost o lucrare a trei autori [7], care într-o anumită măsură au desăvârșit latura formală a cercetărilor. Încă înainte de a fi apărut această lucrare, s-a produs prima surpriză dramatică: lucrarea lui Paul Dirac [8] despre aceeași chestiune. El a fost stimulat de către conferința lui Heisenberg la Cambridge și a ajuns la rezultate asemănătoare cu cele obținute de noi la Göttingen, cu deosebirea că el nu a recurs la ajutorul cunoscutei teorii a matricelor a matematicienilor, ci a descoperit și a dezvoltat de sine stătător teoria acestor simboluri necomutative.

Prima aplicație nebanală, și importantă din punct de vedere fizic, a mecanicii cuantice a fost realizată în curând de către W. Pauli [9], care a calculat, cu ajutorul metodei matriceale, mărimile energiilor stărilor staționare ale atomului de hidrogen și a găsit o coincidență perfectă cu formulele lui Bohr. Din acest moment, valabilitatea teoriei era în afară de orice îndoială.

Dar rămânea cu totul neclară semnificația acestui formalism. Așa cum se întâmplă adesea, matematica a fost mai perspicace decât gândirea interpretativă. În timp ce noi mai discutăm despre aceasta, veni a doua surpriză dramatică : apariția renumitelor lucrări ale lui Schrödinger [10]. El continua un cu totul alt șir de idei, care proveneau de la Louis de Broglie [11]. Cu câțiva ani înainte, acesta formulase aserțiunea îndrăzneță, sprijinită de considerente teoretice strălucite, după care dualitatea undă-corpusul, cunoscută fizicienilor din cazul luminii, ar fi valabilă și pentru electroni ; conform acestor idei, fiecărui electron care se mișcă liber i-ar corespunde o undă plană de o anumită lungime de undă, foarte precisă, determinată de constanta lui Planck și de masă. Nouă, celor de la Göttingen, ne era binecunoscută această lucrare răscolitoare a lui De Broglie. Într-o zi (1925) am primit o scrisoare de la Davisson cu rezultate uimitoare cu privire la reflexia electronilor pe suprafețele metalice. Colegul meu de experimentări, James Franck, și cu mine am presupus îndată că aceste curbe ale

lui Davisson erau spectrul undelor electronice ale lui De Broglie, reflectate de o rețea cristalină, și am îndemnat pe unul dintre elevii noștri, Elsasser, să cerceteze această chestiune [12]. Rezultatele sale au furnizat prima confirmare preliminară a ideii lui De Broglie, care mai târziu a căpătat o confirmare definitivă prin experimentările sistematice realizate în mod independent de Davisson și Germer [13], și de G. P. Thomson [14]. Dar această cunoaștere a concepțiilor lui De Broglie nu ne-a condus mai departe, la o aplicație în ce privește structurile electronice din atomi. Acest lucru i-a fost rezervat lui Schrödinger. El a extins ecuația de undă a lui De Broglie, care se referea la mișcarea liberă, la cazul acțiunii unor forțe, și a dat o formulare exactă a acelor condiții suplimentare, schițate încă de De Broglie, cărora trebuie să li se supună funcția de undă ψ ; și anume, că ea trebuie să fie univocă și finită în spațiu și timp. El a reușit, de asemenea, să deducă stările staționare ale atomului de hidrogen ca soluții monocromatice ale ecuației sale de undă, care nu se propagă la infinit.

În cursul unei perioade scurte de la începutul anului 1926 se părea că în acest domeniu apăruseră brusc două sisteme de explicații închise în sine, dar cu totul diferite: mecanica matriceală și mecanica ondulatorie. Dar în curând, chiar Schrödinger a arătat deplina lor echivalență.

Mecanica ondulatorie s-a bucurat de o popularitate cu mult mai mare decât variantele din Göttingen și Cambridge ale mecanicii cuantice. Ea operează cu o funcție de undă ψ care poate fi reprezentată intuitiv în spațiu cel puțin în cazul unei particule și folosește metodele matematice ale ecuațiilor cu derivate parțiale, binecunoscute fiecărui fizician. Schrödinger mai credea și că teoria sa ondulatorie ar permite o revenire la fizica clasică deterministă; el a propus (și de curând [15] și-a înnoit cu insistență această propunere) ca reprezentarea de particulă să fie cu totul înălăturată, și în loc de electroni ca particule să se vorbească de o distribuție continuă a densității $|\psi|^2$ (sau densitate electrică $|\psi|^2$).

Având în vedere faptele experimentale, nouă, la Göttingen, această interpretare ni s-a părut inacceptabilă. Pe vremea aceea era deja posibil să se numere particulele cu

ajutorul scintilațiilor sau al contoarelor Geiger și să se fotografieze urmele lor cu ajutorul *camerei* Wilson.

Mi se părea că prin considerarea electronilor legați nu se poate ajunge la o interpretare clară a funcției ψ . De aceea, încă de la sfârșitul anului 1925 am depus eforturi pentru a extinde metoda matriceală, care cuprindea evident numai fenomenele oscilatorii, astfel încât ea să poată fi aplicată și la procesele neperiodice. Pe atunci, mă aflam ca oaspete la Institute of Technology, din Massachusetts, în Statele Unite, și am găsit acolo un colaborator excelent în persoana lui Norbert Wiener. În lucrarea noastră comună [16] am înlocuit matricea prin conceptul general de operator, făcând astfel posibilă descrierea proceselor neperiodice. Totuși, am ratat drumul just. Acesta i-a rămas rezervat lui Schrödinger, și am preluat îndată metoda, pentru că ea promitea să conducă la o interpretare a funcției ψ . Din nou, o idee a lui Einstein a avut un rol conducător. El încerca să facă accesibilă dualitatea particulă (cuantă de lumină sau fotoni)-undă interpretând pătratul amplitudinii undelor optice ca densitate de probabilitate a apariției fotonilor. Această idee putea fi extinsă de îndată la funcția ψ ; funcția $|\psi|^2$ trebuie să reprezinte densitatea de probabilitate pentru electroni (sau alte particule). Era ușor să afirmi așa ceva. Dar cum s-o demonstrezi?

Pentru aceasta aveam la dispoziție procesele de ciocnire atomică. O ploaie de electroni, sosită din infinit și reprezentată de o undă incidentă de intensitate dată (adică $|\psi|^2$), întâlnește un obstacol, să zicem un atom greu. După cum undele de apă, datorate înaintării unui vapor, provoacă, în cazul ciocnirii de un pilon, unde circulare secundare, tot astfel și unda electronică de incidență este transformată în parte de către atom într-o undă sferică secundară care, în direcții diferite, posedă amplitudini ψ diferite. Atunci, la distanțe mari de centrul de dispersie, pătratul amplitudinii acestor unde sferice determină probabilitatea relativă a dispersiei în funcție de direcție. Dacă, în plus, atomul respectiv este apt de diferite stări staționare, atunci din ecuația de undă a lui Schrödinger se obțin cu totul de la sine și probabilitățile de excitare a acestor stări, iar electronul se dispersează cu pierdere de energie sau, cum se spune, neelastic. Astfel au putut fi justificate teoretic, în

mod riguros [17], legile ciocnirii descoperite pentru prima oară experimental de către Franck și Hertz; aceste legi formau atunci baza teoriei lui Bohr. În curînd, a reușit și Wentzel [18] să deducă din teoria mea cunoscuta formulă a lui Rutherford pentru împrăștierea radiațiilor α .

Mai mult decît aceste succese, a contribuit la acceptarea rapidă a interpretării statistice a funcției ψ o lucrare a lui Heisenberg [19], care conține renumitele sale relații de imprecizie. Abia atunci a devenit clar caracterul revoluționar al noii concepții. S-a constatat că trebuie să renunțăm nu numai la determinismul fizicii clasice, dar și la conceptul naiv al realității, care considera particulele din fizica atomică ca și cum ele ar fi niște grăunte de nisip de dimensiuni extrem de mici. Un grăunte de nisip are în fiecare moment de timp o anumită poziție și o anumită viteză. Ceea ce nu este cazul pentru electroni; cu cît se face mai exact determinarea poziției sale, cu atît devine mai proastă determinarea vitezei sale, și invers. Voi reveni pe scurt la aceste probleme într-un context mai general, dar aș vrea să mai spun în prealabil cîteva cuvinte cu privire la teoria ciocnirilor.

Metodele matematice de aproximare pe care le-am folosit eu erau de-a dreptul primitive și au fost în curînd îmbunătățite. Din bibliografia, care a crescut imens, aș vrea să amintesc numai cîteva din primii autori cărora teoria le datorează un progres însemnat: Faxén în Suedia și Holtsmark în Norvegia [20], Bethe în Germania [21], Mott și Massey în Anglia [22].

În prezent, teoria percuțiilor este o știință aparte, cu propriile ei manuale groase, care m-au depășit mult. În definitiv, toate ramurile moderne ale fizicii, electrodinamica cuantică, teoria mezonilor, teoria nucleelor, teoria radiațiilor cosmice, teoria particulelor elementare și a transformărilor lor, țin de acest domeniu, a cărui discutare ar putea să ne conducă la infinit.

Aș vrea să mai amintesc că în anii 1926—1927 eu am încercat și un alt drum, pentru a sprijini concepția statistică a mecanicii cuantice, în parte în colaborare cu fizicianul rus Fock [23]. În lucrarea celor trei autori amintită mai sus există un capitol în care funcția lui Schrödinger este propriu-zis anticipată; numai că ea nu este concepută ca

o funcție spațială $\psi(x)$, ci ca o funcție ψ_n de indice discret $n = 1, 2, \dots$, care numerotează stările staționare. Dacă sistemul examinat este supus acțiunii unei forțe variabile în timp, atunci și ψ_n devine variabilă în timp, iar $|\psi_n(t)|^2$ înseamnă probabilitatea că la timpul t să se realizeze starea ψ_n . Pornind de la distribuția inițială, în care este prezentă doar o singură stare, se obțin astfel probabilitățile de trecere și pot fi studiate proprietățile lor. Pe atunci m-a interesat în special ce se întâmplă la așa-numitul caz-limită adiabatic, adică în cazul unei influențe exterioare care variază foarte încet ; s-a putut arăta că, așa cum era de așteptat, probabilitatea de trecere se micșorează mereu. Teoria probabilităților de trecere a fost dezvoltată și fructificată în mod independent de către Dirac. Se poate spune că întreaga fizică atomică și nucleară lucrează cu acest sistem de concepte, îndeosebi în acea formă cu totul elegantă pe care i-a dat-o Dirac [24] ; aproape toate experimentele conduc la enunțuri cu privire la frecvențele relative ale evenimentelor, chiar dacă acestea apar sub denumirea de secțiune efectivă sau altele asemenea.

Cum se face deci că totuși cercetători mari ca Einstein, Schrödinger și De Broglie nu se declară satisfăcuți cu această situație ? De fapt, toate aceste obiecții nu sînt orientate împotriva valabilității formulelor, ci împotriva interpretării. Aici trebuie separate două aspecte intim legate : problema determinismului și problema realității.

Mecanica lui Newton este deterministă în sensul următor : dacă situația inițială a sistemului (poziția și viteza tuturor particulelor) este dată exact, atunci situația în orice alt moment de timp (anterior sau posterior) se poate calcula după legile mecanicii. Toate celelalte domenii ale fizicii clasice au fost construite după același tipar. Treptat determinismul mecanicist s-a transformat într-o dogmă conform căreia universul este o mașină, un automat. După cîte știu eu, aceasta nu are vreun precursor în filozofia antică sau medievală ; ideea este un produs al succesului uriaș al mecanicii lui Newton, îndeosebi în astronomie. În secolul al XIX-lea ea a devenit principiul filozofic fundamental al tuturor științelor exacte. Mi-am pus întrebarea dacă aceasta este într-adevăr justificat. Oare într-adevăr, putem face previziuni absolute pentru toate timpurile

pe baza ecuațiilor clasice ale mișcării? Exemple simple arată că acesta este cazul numai dacă avem posibilitatea unor măsurători absolut exacte (a locului, a vitezei sau a altor mărimi). Să considerăm o particulă care se mișcă rectiliniu, fără frecare între două puncte extreme (pereți) de la care ricoșează pe deplin elastic. Particula se mișcă în ambele sensuri cu o viteză constantă egală cu viteza inițială v_0 și se poate spune precis unde va fi ea la un moment dat în ipoteza că v_0 este cunoscut exact. Dacă însă se admite o mică imprecizie Δv_0 , atunci imprecizia preziziunii poziției în momentul de timp t va fi egală cu $t\Delta v_0$, adică ea crește cu t . Dacă așteptăm suficient de mult pînă la timpul $t_c = l/\Delta v_0$, unde l este distanța dintre pereții elastici, atunci imprecizia Δx va fi egală cu întregul interval l . Prin urmare, nu se mai poate spune nimic despre poziția într-un moment de timp ulterior lui t_c . Determinismul trece astfel în indeterminism total îndată ce admitem chiar cea mai mică imprecizie în datele cu privire la viteză. Dar are oare sens, am în vedere un sens fizic și nu metafizic, să vorbim despre date absolute? Avem oare dreptul să spunem că coordonata $x = \pi$ cm, unde $\pi = 3,1415\dots$ este cunoscutul număr transcendent, care determină raportul dintre lungimea cercului și diametrul său? Ca instrument matematic, conceptul de număr real, reprezentat printr-o fracție zecimală infinită, este extrem de important și rodnic. Ca măsură a unei mărimi fizice, el este un nonsens. Dacă reprezentarea zecimală pentru π este întreruptă în locul al 20-lea sau al 25-lea, se obțin două numere care nu pot fi deosebite prin nici un fel de măsurătoare nici unul de celălalt, nici de π adevărat. Conform cu principiul euristic utilizat de Einstein în teoria relativității și de Heisenberg în teoria cuantelor, asemenea concepte, care nu corespund nici unei observații imaginabile, trebuie să fie eliminate din fizică. Acest lucru este posibil fără nici o dificultate. Trebuie doar înlocuite enunțuri ca: $x = \pi$ cm, prin enunțuri ca: probabilitatea distribuției valorilor lui x , care are un maxim pronunțat în cazul lui $x = \pi$ cm, și (dacă vrem să fim mai exacti) adăugăm: de cutare sau cutare împrăștiere. Într-un cuvînt, și mecanica obișnuită trebuie să fie formulată statistic. Eu m-am ocupat puțin în ultima vreme de această

problemă și m-am convins că lucrul este posibil fără dificultăți. Nu este locul să ne oprim mai amănunțit asupra acestui lucru aici. Vreau să subliniez: determinismul fizicii clasice se dovedește o himeră provocată de supraevaluarea conceptelor structurale logico-matematice. În cercetarea naturii el este un idol, nu un ideal, și de aceea nu poate fi utilizat ca obiecție împotriva interpretării statistice, principial nedeterminate, a mecanicii cuantice.

Cu mult mai dificilă este obiecția cu privire la realitate. Conceptul de particulă, de exemplu, de grăunte de nisip, conține implicit reprezentarea că se află într-un anumit loc și că are o anumită mișcare. Dar, în conformitate cu mecanica cuantică, este imposibil să se stabilească pentru electroni, cu exactitatea dorită și simultan, poziția și mișcarea (mai exact, impulsul, adică masa înmulțită cu viteza). Se ridică astfel două întrebări: în primul rând, ce ne împiedică ca, în pofida afirmației teoretice, să măsurăm ambele mărimi cu aproximația dorită prin experimente perfecționate? În al doilea rând, dacă rezultă că acest lucru într-adevăr nu merge, mai avem atunci dreptul să aplicăm la electroni conceptul de particulă și reprezentările asociate cu el?

În ce privește prima întrebare, este clar că dacă teoria este valabilă — iar noi avem suficiente temeiuri pentru a crede acest lucru —, piedica măsurării simultane a poziției și mișcării (și a altor asemenea perechi de mărimi așa-zis conjugate) trebuie să se afle în legile mecanice cuantice înseși. De fapt, chiar așa stau lucrurile. Dar nu e cu totul evident. Însuși Niels Bohr [25] și-a dat multă osteneală și a cheltuit multă ingeniozitate pentru a dezvolta o teorie a măsurătorii care să lămurească situația și să țină piept chiar și celor mai rafinate obiecții ale lui Einstein, care a încercat în repetate rânduri să inventeze asemenea instalații de măsurare care să permită măsurarea simultană și exactă a poziției și impulsului. Concluzia poate fi următoarea: pentru a măsura coordonatele spațiale și momentele de timp e nevoie de rigle de măsurat și de ceasornice rigide. Pentru a măsura impulsuri și energii sînt necesare, dimpotrivă, instalații cu părți mobile, care să permită receptarea și înregistrarea ciocnirii obiectului de măsurat. Dacă ținem seama de faptul că influența reciprocă

între obiect și instrument este de competența mecanicii cuantice, se vede clar că nu poate exista nici o instalație care să satisfacă simultan ambele cerințe. De aceea, există experimente care se exclud reciproc, dar care sînt complementare unul față de celălalt și numai împreună dezvăluie tot ce se poate afla despre un obiect. Această idee de complementaritate este considerată în general în fizică ca fiind cheia pentru înțelegerea intuitivă a proceselor cuantice. Bohr a extins-o într-un mod ingenios asupra domeniilor cu totul diferite, de exemplu, asupra relațiilor dintre conștiință și creier, asupra problemei libertății voinței și asupra altor probleme filozofice fundamentale. Să trecem acum la ultimul punct: mai putem oare numi particulă, lucru, o entitate cu care conceptele de loc și mișcare nu se pot corela la modul cunoscut? Și dacă nu, atunci ce reprezintă acea realitate pentru descrierea căreia am inventat teoria noastră?

Aici răspunsul nu mai ține de fizică, ci de filozofie, și abordarea sa amănunțită ar depăși cu mult cadrul acestei expuneri. Opinia mea în această privință am expus-o detaliat în alt loc [26]¹. Aici vreau să spun numai că susțin cu toată energia menținerea ideii de particule. Evident, trebuie definit din nou ce se înțelege prin aceasta. În acest scop există concepte suficient de elaborate, care sînt cunoscute în matematică sub numele de invarianți ai transformărilor. Fiecare obiect pe care îl percepem se manifestă într-o infinitate de aspecte; conceptul de obiect este invariantul tuturor acestor aspecte. Din acest punct de vedere, sistemul de concepte atît de uzual astăzi, în care apar simultan particula și unda, este justificat pe deplin.

Ultimele cercetări cu privire la nuclee și particule elementare ne-au condus însă la o graniță dincolo de care se pare că acest sistem de concepte nu mai este îndestulător. Ceea ce avem de învățat din istoria originilor mecanicii cuantice, pe care am expus-o aici, este că pentru crearea unei teorii satisfăcătoare presupusa perfecționare a metodelor matematice nu va fi suficientă, că undeva în teo-

¹ A se vedea și studiul *Realitatea fizică*, din prezentul volum, pp. 186—203.

ria noastră este ascuns un concept nejustificat prin nici o experiență și care trebuie eliminat pentru a obține cale liberă.

Bibliografie

- [1] R. Ladenburg, în „Z. f. Phys.“, 4 (1921), p. 451 ; R. Ladenburg, F. Reiche, în „Naturw.“, 11 (1923), p. 584.
- [2] H. A. Kramers, „Nature“, 113 (1924), p. 673.
- [3] H. A. Kramers, W. Heisenberg, în „Z. f. Phys.“, 31 (1925), p. 681.
- [4] M. Born, în „Z. f. Phys.“, 26 (1924) p. 379 ; M. Born, P. Jordan, în „Z. f. Phys.“, 33 (1925), p. 479.
- [5] W. Heisenberg, în „Z. f. Phys.“, 33 (1925), p. 879.
- [6] M. Born, P. Jordan, în „Z. f. Phys.“, 34 (1925), p. 879.
- [7] M. Born, W. Heisenberg, P. Jordan, în „Z. f. Phys.“, 35 (1926), p. 557.
- [8] P. A. Dirac, în „Proc. Roy. Soc.“, A 109 (1925), p. 642.
- [9] W. Pauli, în „Z. f. Phys.“, 36 (1926), p. 336.
- [10] E. Schrödinger, în „Ann. d. Phys.“, (4), 79 (1926), pp. 361, 489, 734 ; 80 (1926), p. 437 ; 81 (1926), p. 109.
- [11] Louis de Broglie, *Thèses*, Paris 1924, „Ann. d. Phys.“, (10), 3 (1925), p. 22.
- [12] W. Elsasser, în „Naturwissenschaften“, 13 (1925), p. 711.
- [13] C. J. Davisson, L. H. Germer, în „Phys. Rev.“, 30 (1927), p. 707.
- [14] G. P. Thomson, A. Reid, în „Nature“ 119 (1927), p. 890 ; G. P. Thomson, în „Proc. Roy. Soc.“, A 117 (1928), p. 600.
- [15] E. Schrödinger, în „Brit. Journ. Phil. Sci.“, 3 (1952), pp. 109, 233.
- [16] M. Born, N. Wiener, în „Z. f. Phys.“, 36 (1926), p. 174.
- [17] M. Born, „Z. f. Phys.“, 37 (1926), p. 863 ; 38 (1926), p. 803 ; „Gött. Nachr. Math.-Phys.“, Kl. (1926), p. 146.
- [18] G. Wentzel, în „Z. f. Phys.“, 40 (1926), p. 590.
- [19] W. Heisenberg, în „Z. f. Phys“, 43 (1927), p. 172.
- [20] H. Faxén, J. Holtsmark, în „Z. f. Phys.“, 45 (1927), p. 307.
- [21] H. Bethe, în „Ann. d. Phys.“, 5 (1930), p. 325.
- [22] N. F. Mott, în „Proc. Roy. Soc.“, A 124 (1929), pp. 422, 425 ; „Cambr. Phil. Soc.“, 25 (1929), p. 304.

- [23] M. Born, in „Z. f. Phys“, **40** (1926), p. 167 ; M. Born, V. Fock, in „Z. f. Phys.“, **51** (1928), p. 165.
- [24] P. A. M. Dirac, in „Proc. Roy. Soc.“, **A 109** (1925), p. 642 ; **110** (1926), p. 561 ; **111** (1926), p. 281 ; **112** (1926), p. 674.
- [25] Niels Bohr, in „Naturwissenschaften“, **16** (1928), p. 245 ; **17** (1929), p. 483 ; **21** (1933), p. 13 ; „Kausalität und Komplementarität“, **6** (1936), p. 293.
- [26] M. Born, in „Phil. Quart.“, **3** (1953), p. 134 ; „Phys. Blätter“, **10** (1954), p. 49.

*Fizică și relativitate**

Mi-a revenit sarcina de cinste de a vorbi despre fizică și relativitate în locul lui Niels Bohr care nu poate veni la Berna. Firește că nu știu la ce s-a gândit Bohr când și-a ales această temă. Nu-mi amintesc ca noi să fi vorbit cândva despre relativitate; de altfel nu aveam ce discuta, deoarece sîntem de aceeași părere în toate punctele esențiale.

După cît mi se pare, titlul fizică și relativitate se poate interpreta în două feluri: fie ca o examinare a faptelor empirice pe care s-a întemeiat principiul relativității, fie ca o privire de ansamblu asupra tuturor influențelor principiului în domeniul fizicii. Or, o asemenea trecere în revistă a fost tocmai scopul acestei conferințe și ar fi pretențios și mult peste puterile mele să întreprind o recapitulare a tuturor comunicărilor prezentate. În loc de aceasta vreau să încerc să vă dau o impresie despre situația din fizică de acum 50 de ani cînd au apărut primele lucrări ale lui Einstein; apoi vreau să analizez puțin conținutul acestor lucrări și să le compar cu realizările predecesorilor lui Einstein: în sfîrșit voi încerca să descriu influența pe care au avut-o lucrările lui Einstein asupra lumii fizicienilor de atunci. Pentru majoritatea celor prezenți toate acestea țin de istorie, căci pe vremea studiilor dumneavoastră teoria relativității era de acum un obiect normal. Pentru cei de o vîrstă cu mine teoria lui Einstein era nouă

* Conferință ținută în limba engleză la Congresul internațional de la Berna, *Cincizeci de ani de teorie a relativității*, la 16 iulie 1955. Versiunea germană a apărut în „Naturwiss. Rundschau”, 1956, p. 417.

și revoluționară, înțelegerea ei cerea un efort considerabil. Nu fiecare putea sau voia să se supună acestui efort. Astfel, s-a întâmplat că perioada de după descoperirea făcută de Einstein a fost plină de polemici științifice care câteodată degenerau în animozități pronunțate. Voi încerca să evoc în fața dumneavoastră aceste zile zbuciumate în care s-au pus bazele fizicii moderne, povestind lucrurile așa cum apăreau ele din unghiul meu de vedere.

Deși în anul 1901, când mi-am început studiile universitare, teoria lui Maxwell era recunoscută, era încă departe de a fi și predată peste tot. O conferință a lui Clemens Schäfer, pe care am audiat-o la Breslau, a fost acolo prima introducere în acest domeniu și ni s-a părut extrem de dificilă. În 1904, când am venit la Göttingen am audiat optica la cursul lui Waldemar Voigt, care pornea de la teoria lui Maxwell. Aceasta era însă o inovație, căci încă cu puțini ani înainte el folosea teoria elastică a luminii. Reprezentantul principal al noii direcții în fizica teoretică era pe atunci la Göttingen Max Abraham, a cărui carte, cunoscută mai târziu ca a lui Abraham și Föppl, astăzi — a lui Abraham și Becker, era cea mai importantă dintre sursele noastre de cunoștințe.

În concluzie aceasta a fost atmosfera științifică în care ne-am format. Mecanica lui Newton domnea încă în mod absolut, în pofida descoperirilor revoluționare ale deceniului precedent: radiațiile Roentgen, radioactivitatea, electronul, formula radiației și cuanta de energie etc. Studentul în fizică continua să mai învețe — și cred că nu numai în Germania — că ultimul țel al fizicii ar consta în reducerea tuturor fenomenelor la mișcarea particulelor, în conformitate cu legile lui Newton. Era o erezie să te îndoiști de aceste legi și nimeni nu concepea așa ceva.

Prima mea întâlnire cu dificultățile cu care avea de luptat această credință ortodoxă a avut loc în 1905, într-un seminar de teorie a electronilor, care era condus nu de un fizician, ci de un matematician, și anume de Hermann Minkowski. Firește, amintirile mele din aceste timpuri de demult sînt intrucîtva șterse. Totuși, sînt absolut sigur că în acest seminar am discutat amănunțit tot ce se cunoștea pe atunci cu privire la electrodinamica și optica sistemelor mobile. Noi studiam lucrările lui Hertz, Fitz

Gerald, Larmor, Lorentz, Poincaré și alții. În plus însă, am căpătat o idee cu privire la concepțiile proprii ale lui Minkowski, care au fost publicate abia peste doi ani.

Importantele studii ale lui H. A. Lorentz din anii 1892 și 1895 despre electrodinamica corpurilor mobile conțineau o parte considerabilă a formalismului teoriei relativității. Totuși, ipotezele sale fundamentale erau cu totul nerelativiste. El presupunea că ar exista un eter în repaus absolut, un fel de „materializare” a spațiului absolut al lui Newton, și prelua chiar timpul absolut al lui Newton. Când a observat însă că ecuațiile sale ale câmpului pentru spațiul vid sînt invariante față de anumite transformări liniare prin care coordonatele x, y, z și timpul t treceau simultan în parametri noi x', y', z', t' , el le dădu denumirea de „coordo-nate locale” și „timp local”. De altfel, aceste transformări, pe care mai tîrziu Poincaré le-a denumit transformări Lorentz, sînt de fapt mai vechi : W. Voigt observase încă din anul 1887 că ecuațiile teoriei elastice a luminii sînt invariante față de aceste transformări. Lorentz arăta apoi că dacă interacțiunea dintre materie și lumină se reduce la prezența electronilor în substanța materială, toate observa-țiile cu privire la efectele de ordinul întâi în $v/c = \beta$ (unde v este viteza materiei, iar c este viteza luminii) pot fi explicate, în special faptul că un observator care participă la mișcare nu putea descoperi nici o influență a mișcării asupra fenomenelor de ordinul întâi. Dar existau cîteva măsura-tori foarte exacte, ca experimentul pe care Michelson l-a realizat mai întîi la Potsdam în anul 1881 și apoi l-a repetat împreună cu Morley, cu o mai mare exactitate, în 1887 în America, care arătau că nu se poate observa vreo influență a mișcării Pămîntului nici în ce privește mări-mile de ordinul al doilea în β . Pentru a explica acest lucru, Fitz Gerald lansă în anul 1892 cunoscuta sa ipoteză de contracție, pe care Lorentz o preluă îndată și o încorporează în teoria sa. Astfel obținu Lorentz un sistem de ecuații ale câmpului pentru corpurile în mișcare, în acord cu toate faptele cunoscute. Ele erau în mod relativist invariante pentru procesele din spațiul vid și aproximativ invariante (pînă la termeni de ordinul întâi în β) pentru corpurile materiale. În pofida tuturor acestor lucruri, Lorentz se men-

ținea la cterul său în repaus absolut și la conceptul tradițional de timp absolut.

Cînd Henri Poincaré a reluat aceste cercetări, el a făcut un pas mai departe. În ce privește lucrările sale, mă bazez mai ales pe excelenta carte a lui Edmund Whittaker *A History of the Theories of Aether and Electricity*, care mi-a fost o călăuză valoroasă încă din anii de studenție. Deși la o vîrstă înaintată, Whittaker a rescris-o acum în întregime. Volumul al doilea al ediției noi este intitulat *Teorii moderne, 1900—1926*; aici se găsesc citate extrase din lucrările lui Poincaré, dintre care unele le cunosc din versiunea originală. Ele arată că încă în anul 1899 Poincaré considera ca foarte probabil că mișcarea absolută este în principiu neobservabilă și că nu există nici un eter. El a formulat aceste idei ceva mai precis, firește, fără formule matematice, într-o comunicare pe care a ținut-o în anul 1904 în fața unui congres din St. Louis (S.U.A.). Cu acest prilej, el a prezis apariția unei noi mecanici, care se caracterizează prin aceea că nici o viteză nu poate depăși pe cea a luminii.

Aceste considerații au făcut o impresie atît de puternică asupra lui Whittaker, încît el intitulă capitolul corespunzător din cartea sa „Teoria relativității a lui Poincaré și Lorentz”. Contribuția lui Einstein este tratată în această lucrare ca avînd o pondere mică.

Am încercat să-mi fac o opinie proprie în această problemă pe baza amintirilor mele personale și a unor publicații care îmi sînt accesibile.

În anii fericiți de dinainte de primul război mondial, Academia din Göttingen dispunea de o sumă însemnată din așa-numita fundație Wolfskehl, care prevedea să se acorde 100 000 de mărci aceluia care ar fi reușit să demonstreze cunoscuta marea teoremă a lui Fermat din teoria numerelor. Anual soseau sute de scrisori și chiar cărți poștale care afirmau că ele conțin soluția, iar matematicienii din Göttingen erau pe deplin ocupați să găsească erorile. Pînă la urmă, aceasta a devenit atît de împovărător, încît s-a hotărît să se dea banilor o întrebuințare mai utilă, invitînd savanți de seamă să țină prelegeri despre probleme științifice actuale. O asemenea serie de prelegeri a fost aceea a lui Henri Poincaré, de la 22

la 28 aprilie 1909, care a apărut în 1910 într-o carte la Editura Teubner. Am participat la acest „Festival Poincaré”, cum îi ziceam noi, iar acum mi-am îmborsărit amintirile cu ajutorul cărții. Primele cinci prelegeri tratau chestiuni pur matematice; a șasea avea titlul „La Mécanique Nouvelle”. Este o prezentare populară a teoriei relativității, nu conține nici un fel de formule matematice și are foarte puține referiri la alți autori. Einstein și Minkowski nu sînt amintiți de loc. În text apar numele lui Michelson, Abraham și Lorentz. Dar raționamentul lui Poincaré este exact acela pe care l-a folosit Einstein în lucrarea sa din 1905. Înseamnă oare că Poincaré a ajuns la aceste considerații înaintea lui Einstein? Poate că da; dar, curios este că această prelegere lasă cititorului impresia unei dări de seamă despre lucrările lui Lorentz.

Lorentz personal însă n-a avut niciodată pretenția că el ar fi descoperitorul principiului relativității. În anul care a urmat prelegerilor lui Poincaré, a avut loc „Festivalul Lorentz”. Eram pe atunci tînăr docent universitar și am fost numit asistent provizoriu al lui Lorentz, cu însărcinarea de a redacta prelegerile și de a le pune la punct pentru publicare. Astfel, am avut avantajul de a discuta zilnic cu Lorentz. Prelegerile au apărut în „Physikalische Zeitschrift”, vol. 2, 1910, p. 1234. A doua din prelegeri începe cu cuvintele: „A discuta principiul relativității lui Einstein aici la Göttingen, unde a funcționat Minkowski, mi se pare o însărcinare deosebit de agreabilă”. Ceea ce este cu totul suficient pentru a arăta că Lorentz îl considera el însuși pe Einstein ca descoperitor al principiului relativității. Pe aceeași pagină — precum și în paragrafele următoare — se găsesc alte fraze care arată cît de puțin era dispus Lorentz să renunțe la ideea de spațiu absolut și de timp absolut. Cînd l-am vizitat pe Lorentz cu cîțiva ani înainte de moartea lui, scepticismul său cu privire la relativitate continuă să fie același.

Am relatat ceva mai amănunțit aceste vechi istorisiri, pentru a reda atmosfera cercetării științifice de acum 50 de ani și nicidecum pentru că aș considera deosebit de importantă chestiunea priorității.

Acum permiteți-mi să revin la modul în care s-a format propria mea atitudine față de teoria relativității. După

ce am căpătat titlul de doctor în filozofie la Göttingen, am plecat în 1909 la Cambridge, pentru a învăța ceva despre electroni direct de la sursă. Prelegerile lui J. J. Thomson erau într-adevăr foarte interesante; el prezenta experimente impresionante. Dar cursul teoretic al lui Larmor nu mi-a fost util; găseam că dialectul său irlandez este cu totul neinteligibil, iar ceea ce înțelegeam nu mi se părea a fi la înălțimea ideilor lui Minkowski. Apoi m-am întors în orașul meu natal, Breslau, și acolo am auzit, în sfârșit, de numele lui Einstein și am citit articolele sale. Lucram pe atunci la o problemă relativistă inspirată de seminarul lui Minkowski și am vorbit despre aceasta prietenilor mei. Unul dintre ei, un tânăr polonez, Stanislas Loria, mi-a atras atenția asupra lucrărilor lui Einstein. Și astfel le-am studiat în sfârșit. Deși eram deja pe deplin familiarizat cu ideea de relativitate și cu transformările lui Lorentz, succesiunea de idei a lui Einstein mi-a apărut totuși ca o revelație.

Probabil că mulți dintre dumneavoastră ați răsfoit lucrarea sa *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, publicată în „Annalen der Physik” [(4), vol. 17, 1905, p. 811] și ați fost izbiți de unele particularități ale ei. Prima trăsătură surprinzătoare este faptul că lucrarea nu are nici o referire bibliografică. Apare în felul acesta impresia că ar fi vorba de ceva cu totul nou. Dar, după cum am încercat să vă lămuresc, nu așa stau lucrurile. Sîntem în posesia mărturiei aduse de Einstein însuși cu privire la această chestiune. Carl Seelig care a publicat fermecătoarea carte *Einstein și Elveția* l-a întrebat în scris pe Einstein despre literatura științifică care a contribuit la ideile sale despre relativitate în timpul perioadei sale de la Berna și a primit la 19 februarie 1955 răspunsul care a fost publicat în „Technischen Rundschau”, nr. 20, anul 47, Berna, 6 mai 1955. Einstein scria :

„Fără îndoială că teoria relativității restrînse, dacă considerăm retrospectiv dezvoltarea ei, era în 1905 coaptă pentru descoperire. Lorentz recunoscuse deja că pentru analiza ecuațiilor lui Maxwell sînt esențiale transformările care mai tîrziu au căpătat numele lui, iar Poincaré a adîncit încă această cunoaștere. În ce mă privește, eu cunoaștem numai importante lucrări ale lui Lorentz din

1895, *La théorie électromagnétique de Maxwell* și *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, dar nu și lucrările ulterioare ale lui Lorentz și nici cercetarea conexă a lui Poincaré. În acest sens, lucrarea mea din 1905 era de sine stătătoare.

Ceea ce constituia pentru mine o noutate era recunoașterea faptului că transformările Lorentz sînt importante nu numai în legătură cu ecuațiile lui Maxwell, ci cu însăși problema esenței spațiului și timpului în general. Era nou și punctul de vedere că invarianța Lorentz este o condiție generală pentru orice teorie. Aceasta era pentru mine de o importanță deosebită, deoarece îmi dădusem seama încă dinainte că teoria lui Maxwell nu exprimă microstructura radiației și nu este în general valabilă.

Acest extras din scrisoare lămurește situația pe deplin. Ultima propoziție este deosebit de importantă. Căci ea arată că ambele lucrări ale lui Einstein din anul 1905, una cu privire la principiul relativității, cealaltă cu privire la cuantele de lumină, nu sînt lipsite de conexiune. Încă de pe atunci el considera că ecuațiile lui Maxwell sînt valabile numai aproximativ, că comportarea de fapt a luminii este mai complicată și poate fi descrisă cu ajutorul cuantelor de lumină (al fotonilor după cum le spunem astăzi); că, pe de altă parte, principiul relativității este de o importanță generală și trebuie întemeiat pe considerente care rămîn valabile chiar dacă ecuațiile lui Maxwell ar trebui să fie abandonate și înlocuite printr-o nouă teorie a structurii fine a luminii (electrodinamica cuantică de astăzi).

A doua trăsătură proprie a acestei prime lucrări a lui Einstein din domeniul relativității este punctul de pornire ales de el, faptele empirice pe care își construiește teoria. Ele sînt surprinzător de simple. El spune că formularea uzuală a legii inducției conține o asimetrie introdusă în mod artificial și nu corespunde nici unui fapt. Observația arată că curentul indus depinde numai de mișcarea relativă a firului electric și a magnetului, în timp ce teoria uzuală explică efectul într-un mod cu totul diferit, după cum firul electric este în repaus și magnetul în mișcare, sau invers. Einstein adaugă apoi o scurtă observație, după

care toate încercările de a cerceta mișcarea Pământului prin experimente terestre trebuie să dea greș. Se ajunge la impresia că în fond experimentul lui Michelson n-a avut o importanță așa de mare și că Einstein ar fi stabilit principiul său, al relativității, în orice caz.

Acest principiu și cerința ca viteza luminii să fie constantă, independent de sistemul de referință, sînt unicele ipoteze din care, în cîteva pagini, se derivă întreaga teorie. Primul pas rezidă în demonstrarea faptului că simultaneitatea absolută a două evenimente din locuri diferite n-are nici un sens fizic. Apoi se definește simultaneitatea relativă, prin condiția ca ceasornicele din diferite locuri ale unui sistem de referință să fie astfel situate, încît un semnal luminos să aibă nevoie de același timp pentru a parcurge drumul în ambele direcții de la un loc la celălalt. Această definiție conduce numaidecît la transformările Lorentz și la tot ce rezultă din ele: contracția lui Lorentz-Fitz Gerald, dilatarea timpului, teorema de adunare a vitezelor, legea transformării pentru componentele cîmpului electromagnetic în spațiu vid, principiul lui Doppler, efectul de aberație, legea de transformare a energiei, ecuațiile de mișcare a electronului și formulele pentru masa longitudinală și transversală ca funcții de viteză.

Dar pentru mine — și pentru mulți alții — elementul tulburător al acestei lucrări nu erau atît simplitatea ei și caracterul ei complet, cît îndrăzneala de a ataca filozofia unanim acceptată a lui Isaac Newton, conceptele tradiționale de spațiu și timp. Aceasta deosebește contribuția lui Einstein de cele ale predecesorilor săi și ne îndreptățește să vorbim de teoria relativității a lui Einstein, cu toată opinia diferită a lui Whittaker.

A doua lucrare a lui Einstein despre relativitate, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt Abhängig?* (Depinde oare inerția unui corp de conținutul său de energie?) în „Ann. d. Phys.“ (4), 18 (1905), p. 639, conține pe trei pagini o demonstrație a renumitei formule $E = mc^2$, care exprimă echivalența dintre energia E și masa m , și care a devenit de o importanță atît de fundamentală pentru fizica nucleară, pentru înțelegerea structurii materiei și a originii energiei stelare și pentru utilizarea tehnică a energiei nucleare — la bine ca și la rău.

Și această lucrare a devenit obiectul unor dispute refc-
ritoare la prioritate. Formula era într-adevăr cunoscută
în anumite cazuri speciale încă dinainte; de exemplu, fi-
zicianul austriac F. Hasenöhrl arătase încă în 1904 că în
interiorul unui vas închis radiația electromagnetică mă-
rește rezistența sa față de accelerație, adică față de masa
sa. Hasenöhrl a căzut în primul război mondial și deci
n-avea cum să se împotrivească când ulterior s-a abuzat
de numele său pentru a discredita contribuția lui Einstein.
Dar nu vreau să insist asupra acestor istorii urâte. Am
amintit de acest fapt doar pentru a sublinia că principiul
relativității restrânse nu a fost o descoperire a unui singur
om. Einstein a pus ultima cărămidă la construcția pe care
au zidit-o Lorentz, Poincaré și alții, și pe temelia căreia
și-a ridicat clădirea Minkowski. Găsesc că nu este drept
ca toți acești oameni să fie uitați, așa cum se întâmplă în
multe cărți. Chiar și remarcabila biografie a lui Philipp
Frank, *Einstein, viața și timpul său*, nu poate fi absolvită
de asemenea reproșuri; el spune, de pildă (în capitolul
III, punctul 6 al ediției germane), că nimeni înainte de
Einstein nu s-a gândit la o nouă structură a legilor me-
canicii, în care viteza luminii să aibă un rol privilegiat.
Atît Lorentz cît și Poincaré au avut aceste idei, iar ex-
presia relativității pentru masă (care îl conține pe c) este
pe bună dreptate denumită formula lui Lorentz.

Astăzi, această formulă este atît de cunoscută încît cu
greu ne mai putem imagina incisivitatea disputelor pur-
tate în jurul ei. În anul 1901, la Göttingen, W. Kaufmann,
cercetînd devierile magnetice ale radiațiilor catodice de
mare viteză, a stabilit în primul rînd că masa electronilor
depinde de viteza lor. Max Abraham, de care am mai
amintit, a primit provocarea teoreticienilor și a arătat că
masa electromagnetică introdusă de J. J. Thomson, adică
energia proprie a cîmpului propriu al electronului, se con-
stată a fi, la un calcul mai exact, funcție de viteză, cu
toate că el mai presupunea că electronul ar fi o sferă ri-
gidă. Mai tîrziu, el și-a modificat totuși teoria, astfel încît
a ținut seama de contracția Lorentz-Fitz Rerald și a obți-
nut atunci exact aceeași formulă pe care Lorentz o dedu-
sesse deja într-un mod mai simplu. Felul în care depinde
energia și masa de viteză n-are într-adevăr nimic de-a face

cu structura corpului considerat, ci se întemeiază pe un considerent relativist general. Înainte de a se fi lămurit acest lucru, mulți teoreticieni au scris lucrări voluminoase, s-ar putea spune că aproape monstruoase cu privire la energia proprie electromagnetică a electronului rigid ; de exemplu, G. Herglotz, P. Hertz, A. Sommerfeld și alții. Și prima mea cercetare s-ar fi aflat în această direcție ; e drept că eu nu am considerat electronul ca fiind un solid rigid în sens clasic, ci am dat o definiție a rigidității relativiste prin generalizarea electronului Lorentz pentru mișcări accelerate. Am folosit acolo metodele pe care le-am învățat de la Minkowski.

Astăzi, toate aceste osteneli ne par risipite în zadar. Datorită teoriei cuantice, problema a căpătat o cu totul altă înfățișare, iar în prezent eforturile sînt mai mult orientate spre ocolirea problemei energiei proprii decît spre rezolvarea ei. Dar va veni o zi cînd ea va apare iar în prim plan.

Minkowski și-a publicat lucrarea *Bazele proceselor electromagnetice în corpurile mobile* în anul 1907. Ea conține o expunere sistematică a încercării sale de a contopi formal spațiul și timpul într-o „lume“ cvadridimensională, dotată cu o geometrie pseudoeuclidiană, pentru care el a dezvoltat un calcul vectorial și tensorial. În curînd, acest calcul a devenit, cu anumite modificări, metoda uzuală în toate cercetările relativiste. În plus, lucrarea lui Minkowski conține importante rezultate noi : un sistem de ecuații ale cîmpului electromagnetic în corpurile materiale mobile care, față de transformările lui Lorentz, este un invariant exact și nu numai în prima aproximație, cum sînt ecuațiile puțin diferite ale lui Lorentz însuși ; apoi, o nouă cale pentru deducerea ecuațiilor mișcării mecanice.

La începutul anului 1908 m-am hotărît să-i trimit lui Minkowski manuscrisul meu cu privire la electroni și am primit un răspuns amical. La 21 septembrie al aceluiași an mă aflu la Köln printre auditorii renumitei sale prelegeri *Raum und Zeit*, în care el și-a expus ideile într-o formă popularizată, pentru membrii asociației cercetătorilor naturii. El m-a invitat să vin la Göttingen pentru a-l ajuta la lucrările ulterioare. S-a întîmplat chiar așa ; dar după cîteva săptămîni, colaborarea noastră s-a sfîrșit,

din cauza morții subite a lui Minkowski. Mi-a revenit sarcina să triez manuscrisele rămase de la el și am reușit să reconstitui o lucrare și s-o public.

Prima mea întâlnire cu Einstein a avut loc în anul următor, în 1909, la întrunirea cercetătorilor naturii de la Salzburg. Einstein a ținut acolo o prelegere cu titlul *Despre noile transformări pe care le-au suferit ideile noastre cu privire la natura luminii*, ceea ce evident înseamnă introducerea cuantelor de lumină. Am ținut și eu o prelegere cu privire la *Dinamica electronului în sistemul principiului relativității*. Acest lucru acum mi se pare amuzant; Einstein depășise tocmai teoria relativității restrânse, pe care a lăsat-o pe seama unor profeți mai mici, în timp ce el însuși medita asupra unor enigme noi legate de teoria cuantică a luminii și asupra gravitației și a relativității generale, care pe atunci, ce-i drept, nu erau încă coapte pentru o dezbatere publică.

Începând de atunci, l-am întâlnit pe Einstein din când în când la congrese și am schimbat câteva scrisori cu el. El a devenit profesor la Universitatea din Zürich în anul 1909, a plecat în 1910 la Praga, iar în 1912 a revenit la Zürich ca profesor la politehnică. Chiar în anul următor a plecat la Berlin, unde Academia Prusiei i-a oferit catedra devenită vacantă prin moartea lui Van't Hoff, un loc deosebit de convenabil nefiind legat de nici un fel de obligații didactice sau de altă natură. Această invitație se datora mai ales străduințelor lui Max Planck, care s-a interesat de la bun început de teoria relativității și scrisese lucrări importante cu privire la mecanica și termodinamica relativistă. Peste doi ani, în 1915, am fost și eu chemat la Berlin, de asemenea la insistențele lui Planck, care avea nevoie de o reducere a sarcinilor sale didactice. Următorii patru ani sînt printre cei mai memorabili din viața mea, nu atît pentru că bîntuia primul război mondial, cu consecințele sale pline de griji, enervări, lipsuri și umilințe, ci pentru că eram aproape de Planck și Einstein.

Aceasta a fost unica perioadă în care îl vedeam pe Einstein foarte frecvent, uneori aproape zilnic. Am avut astfel posibilitatea să observ munca sa intelectuală, să aflu ideile sale cu privire la fizică și multe alte lucruri de natură științifică, artistică sau umană.

În această perioadă, el a reușit să ajungă la formularea definitivă a principiului relativității generale. Spre deosebire de teoria restrînsă, acest principiu a fost într-adevăr o realizare a unui singur om. Ea a început cu o lucrare publicată încă în decembrie 1907 ; lucrarea conține principiul echivalenței masei și energiei, unicul punct de sprijin empiric pe care s-a înălțat apoi întregul edificiu măreț al teoriei relativității generale.

Cînd am vorbit anterior despre faptele empirice pe care Einstein le-a folosit în 1905 pentru edificarea teoriei sale a relativității restrînse, spuneam că pesemne mai de grabă legea inducției electromagnetice decît experimentul lui Michelson i-a arătat calea. Pe atunci însă, legea inducției era în vîrstă de vreo 70 de ani — Faraday o descoperise în anul 1834 — și fiecare știa că efectul depinde numai de mișcarea relativă, dar nimeni nu făcea caz de faptul că teoria nu ține seamă de această împrejurare.

În cazul principiului echivalenței, situația este asemănătoare. Numai că faptul empiric esențial era cunoscut cu mult înainte, și anume de aproximativ 250 de ani. Încă Galilei stabilise că sub acțiunea gravitației terestre toate corpurile se mișcă cu una și aceeași accelerație, iar Newton a generalizat aceasta pentru atracția universală a corpurilor cerești. Acest fapt, confirmat de măsurători exacte ale oscilațiilor pendulului, și anume că masa inerțială și cea gravitațională sînt egale, era privit ca o proprietate deosebită a forței greutății a lui Newton, și se pare că nimeni nu și-a bătut capul cu aceasta.

Principiul relativității restrînse a extins situația privilegiată a sistemelor inerțiale din mecanica lui Newton la toate fenomenele fizice ; mișcarea absolută nu se putea constata, întrucît nu avea loc nici o accelerație. Dar asemenea efecte inerțiale, ca forțele centrifuge și efectele electromagnetice analoge care apar în sistemele cu accelerație, de exemplu în sistemele în rotație, puteau fi descrise numai în termenii spațiului absolut. Aceasta i se păru lui Einstein insuportabil. Meditînd asupra acestui lucru, el a observat că datorită egalității dintre masa inerțială și cea gravitațională, un observator aflat într-o ladă închisă nu ar putea să decidă dacă o mișcare neuniformă

a unui corp din ladă provine din accelerația lăzii întregi sau de la un câmp gravitațional exterior. Aceasta i-a dat cheia pentru relativitatea generală. Einstein a postulat că această echivalență trebuie să fie valabilă ca principiu general pentru toate procesele din natură și nu numai pentru mișcările mecanice. Astfel a ajuns el, în 1911, la concluzia că o rază de lumină trebuie să se curbeze într-un câmp gravitațional și a propus de îndată ca formula sa simplă de deviere să fie verificată experimental prin observarea pozițiilor pe care le ocupă stelele fixe aproape de marginea Soarelui în timpul unei eclipse solare totale.

Elaborarea în fapt a teoriei a fost o sarcină uriașă, căci ea pretindea o ramură a matematicii care fizicienilor nu le era de loc cunoscută. Unii fizicieni de orientare conservatoare, Abraham, Mie, Nordström și alții, au încercat, pe baza principiului de echivalență al lui Einstein să dezvolte o teorie scalară a câmpului gravitațional fără un succes direct. Einstein însuși a fost cel care a descoperit adevăratul aparat matematic în geometria lui Riemann și în dezvoltările ei de către Ricci și Levi-Civita, și a găsit în vechiul său prieten, Marcel Grossmann, un colaborator înzestrat. Dar lucrarea a pretins mai mulți ani, și de-abia în 1915 a fost oarecum încheiată.

Îmi amintesc că în timpul călătoriei mele de nuntă, în anul 1913, în bagajul meu se aflau câteva imprimare speciale din articolele lui Einstein, care mă rețineau adesea ore întregi, spre marea dezamăgire a tinerei mele soții. Aceste articole mi se păreau captivante și emoționante, dar atât de dificile, încât aproape că te înspăimîntau. Când mai târziu, în 1915, l-am întâlnit pe Einstein la Berlin, teoria avansase mult, apropiindu-se de punctul ei culminant, explicarea anomaliei din mișcarea periheliului lui Mercur, pe care o descoperise Leverrier. Am cunoscut această teorie nu numai din publicații, ci din numeroasele convorbiri cu Einstein. Rezultatul a fost că am luat hotărîrea fermă de a nu încerca niciodată să lucrez în acest domeniu. Stabilirea teoriei relativității generale mi se părea atunci și mi se mai pare și astăzi ca fiind cea mai mare realizare a gândirii umane despre natură, îmbinarea cea mai uimitoare a profunzimii filozofice, a intuiției fizice și a măiestriei matematice. Dar ea avea pe atunci prea pu-

țină legătură cu faptele empirice. Ea mă atrăgea ca o operă de artă care te încântă și pe care o admiri de la distanța cuvenită.

În conformitate cu explicația pe care am dat-o titlului acestei conferințe, nu mă voi lăsa antrenat într-o discuție amănunțită cu privire la confirmările experimentale ale teoriei restrânse și generale; îmi lipsește competența celor care au dezbătut deja chestiunea în cursul acestui congres. Vreau să amintesc doar evenimentele cele mai importante.

În primul rînd, voi numi teoria relativistă a lui Sommerfeld despre structura fină a liniilor Balmer din spectrul hidrogenului, din 1915. Ea se întemeiază pe faptul matematic că variabilitatea masei cu viteza determină o precizie a periheliului elipsei lui Kepler. Este foarte interesant că încă Poincaré a avut în vedere acest efect. El a pus întrebarea dacă aceasta ar putea explica anomalia lui Leverrier din mișcarea planetei Mercur; o observație în legătură cu aceasta se află în prelegerea de la Göttingen a lui Poincaré, pe care am amintit-o mai sus. Rezultatul a fost firește negativ, deoarece viteza planetei Mercur este prea mică în raport cu viteza luminii. În ce privește mișcarea electronului în jurul protonului, lucrurile stau altfel, și combinarea mișcării periheliului cu condițiile cuantice ale lui Bohr și Sommerfeld a condus la explicarea scindărilor liniilor lui Balmer.

Forma modernă a teoriei spectrului hidrogenului pornește de la ecuația relativistă a undelor a lui Dirac și este astăzi o bijuterie a electrodinamicii cuantice rafinate.

Amintesc apoi teoria elementară a efectului Compton care se bazează pe o îmbinare originală a ideilor lui Einstein cu privire la cuantele de lumină și relativitate.

Dilatarea timpului a fost confirmată direct prin observarea efectului transversal Doppler la radiațiile canal ale hidrogenului (prima oară în 1938 de către Ives și Stievel și apoi cu mai mare precizie în 1939 de către Ruchardt și Otting). Și ea are un rol important în cercetarea modernă a radiației cosmice, unde, în virtutea marilor viteze, perioadele observate de viață a mezonilor pot fi de 100 de ori mai lungi decît într-un sistem de repaus al particulelor.

Astăzi, aplicațiile relativității restrînse sînt ceva de la sine înțeles ; întreaga fizică atomică este atît de impregnată de ea, încît ar fi cu totul lipsit de sens să vorbim despre anumite fenomene ca fiind o confirmare a teoriei lui Einstein.

Altfel stau lucrurile cu teoria relativității generale ; toate cele trei efecte principale pe care le-a prezis Einstein există, dar problema concordanței cantitative dintre teorie și observație continuă să fie în discuție. Adevărata semnificație a teoriei relativității generale rezidă de fapt în revoluția pe care ea a provocat-o în cosmologie. Aceasta a început în anul 1917 cu o lucrare a lui Einstein, în care el a generalizat ecuațiile sale de mișcare a cîmpului, prin adăugarea așa-numitului termen cosmologic, și a arătat că în acest caz există o soluție care reprezintă un univers închis. Această presupunere, după care spațiul poate să fie finit și totuși nemărginit, este una dintre ideile cele mai îndrăznețe care s-au pronunțat vreodată cu privire la natura cosmosului. Ea rezolva enigma de ce sistemul stelar nu s-a împrăștiat și nu s-a rarefiat în cursul timpului, ceea ce ar fi trebuit să se întîmple dacă spațiul ar fi infinit ; aceasta dădea un sens fizic principiului lui Mach după care legea inerției trebuie să fie considerată nu ca un efect al spațiului vid, ci al sistemului stelar. Și astfel s-a deschis calea spre înțelegerea faptului că sistemul stelar se dilată. Aici teoria relativității generale vine din nou în contact nemijlocit cu observația faptelor empirice găsite de către Shapley, Hubble și alții. Astăzi cosmologia este o știință cuprinzătoare, cu numeroase studii și cărți despre care eu știu prea puțin. De aceea, sînt nevoit să trec cu vederea tocmai acele influențe ale gîndirii lui Einstein care trebuie să fie considerate drept cea mai mare contribuție a lui.

În schimb, aș vrea să mai amintesc cîte ceva despre relațiile mele personale cu Einstein în acele zile de demult, și despre divergențele de opinii care s-au produs în cele din urmă între noi cu privire la principiile fundamentale ale fizicii.

Discuțiile noastre de la Berlin s-au extins departe, dincolo de problemele relativității, ba chiar dincolo de fizică. Deoarece se dezlănțuise primul război mondial, po-

litica juca firește un rol considerabil. Dar cu oricâtă plăcere aş povesti câte ceva despre aceste convorbiri, trebuie totuși să mă limitez la fizică.

Pe atunci, Einstein lucra împreună cu De Haas la experimente referitoare la așa-numitul efect giromagnetic; ei au demonstrat existența curentului molecular al lui Ampère. Einstein se interesa de asemenea în mod deosebit de teoria cuantelor și era neliniștit din cauza paradoxurilor care apăruseră pe atunci în cuprinsul ei.

În anul 1919 am devenit succesorul lui Von Laue la Frankfurt, și relațiile apropiate cu Einstein s-au încheiat. Dar noi ne vizitam des și am avut un schimb viu de scrisori din care vă voi da unele exemple. Era vremea când Einstein devenise brusc o celebritate mondială, iar teoria sa ca, și personalitatea sa, obiectul unor dispute fanatice.

Cu puțin înainte de izbucnirea războiului, o expediție germană pornise la drum spre Rusia pentru a examina previziunea lui Einstein cu privire la abaterea luminii de către Soare în cazul unei eclipse totale; dezlănțuirea ostilităților a pus capăt acestei întreprinderi, iar astronomii germani au ajuns prizonieri la ruși. Apoi, după sfârșitul războiului, s-au organizat două expediții britanice, sub conducerea lui Sir Arthur Eddington, și ele au fost încununate de succes. Este absolut imposibil să descriu agitația pe care a provocat-o acest eveniment în întreaga lume. Einstein deveni dintr-o dată figura cea mai renumită și mai populară, omul care a spart zidul urii și i-a unit pe savanți într-un efort comun, omul care a înlocuit vechiul sistem al lumii, datorat lui Isaac Newton, cu unul nou, mai bun. Dar în același timp, a crescut și o mișcare de opoziție, sub conducerea lui Philipp Lenard și a lui Johannes Stark, care se manifestase încă de pe vremea când eu mă aflam la Berlin. Această opoziție se întemeia pe un amestec de absurditate extremă de conservatism științific și prejudecăți cu momente afective rasiale și politice, îndreptate împotriva originii evreiești a lui Einstein și a orientării sale pacifiste și antimilitariste. Vă dau aici unele exemple din scrisorile lui Einstein; una, datată 4 iunie 1919, începe cu fizica: „...Teoria cuantică declanșează la

mine sentimente cu totul asemănătoare cu cele ale dumneavoastră. De fapt, ar trebui să ne rușinăm de succese, deoarece ele au fost obținute după principiul iezuit: o mînă nu trebuie să știe ceea ce face cealaltă...", și continuă apoi, vorbind despre politică: "...Este oare permis unui frate X, înrăit și determinist, să plîngă cu lacrimi în ochi că și-a pierdut credința în oameni? Tocmai comportarea pătimasă a oamenilor de astăzi în chestiunile politice este chemată să învie credința în determinism..."

Se vede că filozofia sa deterministă, care mai târziu l-a despărțit de majoritatea fizicienilor, nu se limita numai la chestiuni științifice, ci se aplica și la cele umane.

Pe timpul acela, în Germania inflația începuse să devină un pericol serios. În institutul meu, Stern și Gerlach erau ocupați cu pregătirile pentru cunoscutul lor experiment, dar foarte stingheriți de lipsa de bani. Am hotărît să organizez un șir de prelegeri de popularizare a teoriei relativității și să încasez taxă de intrare, pentru ca astfel să utilizez cererea generală de informație în acest domeniu pentru finanțarea cercetărilor noastre. A fost un mare succes. Biletele s-au vîndut în întregime și, cînd mai târziu am publicat prelegerile într-o carte, s-au epuizat repede trei ediții. Einstein a fost atît de plăcut impresionat de străduințele mele, încît într-o scrisoare din 9 noiembrie 1919 mi-a propus să trecem la „tu“. Aceeași scrisoare conține și unele propuneri cu privire la felul în care evreii ar trebui să reacționeze la instigația antisemită:

„Așadar, de acum încolo să ne spunem tu; dacă tu îmi permiți..., aș considera rezonabil ca evreii înșiși să adune bani pentru a oferi cercetătorilor evrei sprijin și posibilități de predare în afara universităților...”

În „Frankfurter Zeitung“ au apărut atacuri ale unor oameni de știință și filozofi cunoscuți împotriva lui Einstein, care m-au enervat și mi-au trezit combativitatea. Am răspuns în cîteva articole foarte succulente. Se pare că Einstein s-a amuzat de activitatea mea ziaristică. La 9 decembrie 1919 el scria: „Excelentul tău articol din „Frankfurter Zeitung“ m-a bucurat foarte mult. Dar de-acum, și tu ca și mine, vei fi persecutat de cei din presă și de alții de teapa lor, deși poate într-o măsură mai mică. Cu

mine lucrurile stau așa de prost, încât abia de mai pot răsufla ; să-mi reiau activitatea nici nu încape vorbă...”

Aproximativ cu un an mai târziu, la 9 septembrie 1920, el scria :

„...După cum la omul din poveste tot ce atinge se prefăcea în aur, tot astfel la mine totul devine larmă de gazetă. *Suum cuique...*”

Celor care se interesează de acel timp când întreaga lume își ieșise din fire, datorită unei teorii fizice pe care n-o înțelegea nimeni, și în toate țările oamenii luau poziție pentru și contra lui Einstein, le pot recomanda excelenta expunere din cartea lui Philipp Frank pe care am mai citat-o.

Treptat însă, problemele științifice și-au câștigat locul cuvenit în corespondența noastră. Aș vrea să citez un fragment dintr-o scrisoare din același an (3 martie 1920) :

„În timpul meu liber continui să meditez cu privire la problema cuantelor din punctul de vedere al relativității. Nu cred că teoria se va putea lipsi de continuu. Dar nu reușesc să dau o formă palpabilă ideii mele preferate de a înțelege teoria cuantelor cu ajutorul ecuațiilor diferențiale...”

Încă pe vremea aceea discutam problema compatibilității teoriei cuantelor cu cauzalitatea. Citez o frază dintr-o scrisoare a lui Einstein din 27 ianuarie 1920 :

„...ceea ce se leagă de cauzalitate mă chinuiește de asemenea mult. Oare absorbția și emisiunea cuantică a luminii vor fi vreodată înțelese în sensul cerințelor cauzalității depline sau va rămîne un rest statistic ? Trebuie să recunosc că îmi lipsește curajul unei convingeri, dar renunț cu foarte, foarte multă neplăcere la cauzalitatea deplină...”

De pe atunci, drumurile noastre științifice începeau să se despartă tot mai mult. Am venit la Göttingen și am intrat în contact cu Niels Bohr, Pauli și Heisenberg. Când în 1926 a fost elaborată mecanica cuantică, speram firește ca Einstein să fie de acord, dar am fost decepționat. Iată un extras dintr-o scrisoare a lui din 12 decembrie 1926.

„...Mecanica cuantică inspiră multă considerație. Dar o voce interioară îmi spune că acesta nu este totuși Iacob

cel adevărat¹. Teoria dă multe, dar nu ne prea apropie de taina Bătrînului. În orice caz, eu sînt convins că el nu joacă zaruri... Mă chinuiesc să deduc ecuațiile de mișcare ale punctelor materiale concepute ca singularități din ecuațiile diferențiale ale relativității generale“.

Ultima propoziție se referă la o cercetare care s-a încheiat abia mult mai tîrziu la Princeton, și anume în colaborare cu Benesh Hoffmann și Leopold Infeld. Este de fapt ultima mare contribuție a lui Einstein la teoria relativității generale. Presupunerea făcută în teoria inițială că o particulă materială liberă (de exemplu, un corp ceresc) se mișcă de-a lungul unei linii geodezice se dovedește inutilă; ea poate fi dedusă din ecuațiile cîmpului printr-un procedeu subtil de aproximări succesive. Aceste cercetări adînci și dificile au fost apoi desăvîrșite de către Fock și Infeld.

Prima parte a ultimei scrisori citate se referă la refuzul lui Einstein de a considera legile statistice din fizică ca definitive. El utilizează aici imaginea unui „dumnezeu care joacă zaruri“ pe care a folosit-o mai tîrziu în repetate rînduri în convorbiri și în scrisori.

În ultima perioadă a vieții sale petrecută la Princeton, Einstein și-a concentrat întreaga perspicacitate și toate forțele sale pentru o nouă fundamentare a fizicii, care să fie în acord cu convingerile sale filozofice fundamentale, și anume, că trebuie să fie posibil să ne reprezentăm lumea ca o realitate independentă de subiectul observator și că în această lume obiectivă legile sînt riguros cauzale (în sens determinist). Acesta a fost scopul pe care Einstein l-a urmărit cu teoriile sale unitare ale cîmpului, din care el a publicat diferite versiuni, cu speranța constantă că pînă la urmă fenomenele cuantice se vor dovedi consecințe ale ecuațiilor sale ale cîmpului.

Nu pot să spun nimic despre aceste încercări, pentru că eu de la bun început m-am îndoit de succes, și de aceea nu m-am putut decide niciodată să studiez cu atenție deducțiile dificile. Mi se pare că mecanica cuantică a

¹ Einstein face aluzie la situația din povestirea biblică cînd Isac cel orb, al cărui fiu preferat era Iacob, îl binecuvînta pe fiul său Essau, care se dădea drept Iacob. — *N.T.*

urmat mai fidel teoriile inițiale ale lui Einstein, care l-au condus la mari succese, decît el însuși în ultima perioadă a vieții sale.

Ce sînt aceste teorii ? Einstein a spus în repetate rînduri că mare parte din ele le datorează lui Ernst Mach, și de aceea pozitivistii au pretins că este unul dintre al lor. Nu cred că au dreptate, dacă pozitivismul înseamnă doctrina după care scopul științei ar fi descoperirea relațiilor dintre senzațiile noastre. Ideea conducătoare a lui Einstein poate fi exprimată simplu astfel : ceva care, deși poate fi gîndit și despre care se poate forma un concept, dar care datorită propriei sale esențe nu poate fi supus unui examen experimental (cum ar fi simultaneitatea unor evenimente în locuri deosebite), nu are nici un sens fizic.

Efectele cuantice arată că aceasta este adevărat pentru multe concepte din fizica atomică, dar Einstein a refuzat să aplice criteriul său la aceste cazuri. Astfel, el a respins interpretarea uzuală a mecanicii cuantice, deși ea corespunde întru totul teoriei sale generale, și a apucat cu totul alt drum, detașat de orice experiment. Einstein a obținut cel mai mare succes al său sprijinindu-se pe un fapt empiric despre care învață fiecare școlar. Acum el tindea să-și găsească salvarea în gîndirea pură, fără nici un fel de fapte. El avea încredere în puterea rațiunii de a ghici legile după care dumnezeu crease lumea. N-a fost singurul cu această convingere. Unul dintre cei mai proeminenți reprezentanți ai ei a fost Eddington, mai ales în lucrările și cărțile sale de mai tîrziu. În anul 1943 am publicat o cărticică cu titlul *Experiment and Theory in Physics* (Cambridge University Press), în care am încercat să analizez situația și să resping aserțiunile lui Eddington. Am trimis un exemplar lui Einstein și am obținut un răspuns foarte interesant, pe care din păcate l-am pierdut ; totuși, îmi amintesc de o frază care suna cam așa : „Predica ta de călugăr capucin împotriva hegelianismului este foarte amuzantă. Dar eu nu mă las abătut de la străduințele mele de a ghici căile domnului“. Un om de talia lui Einstein, care a obținut atît de mult prin gîndire, are dreptul să împingă metoda apriorică pînă la extrem. Dar cercetarea din domeniul fizicii nu l-a urmat ; ea a acunulat mai departe materialul empiric și l-a interpretat

Într-un mod care lui Einstein îi era cu totul inacceptabil. Pentru el, un potențial sau o componentă a câmpului era un obiect real din natură care se modifică după anumite legi deterministe. Fizica de astăzi operează cu funcții care, deși seamănă cu potențialele clasice în ce privește comportarea matematică, nu reprezintă însă obiecte reale, ci servesc pentru a determina probabilitatea de apariție a unor obiecte reale, indiferent dacă acestea sînt particule, potențiale electromagnetice sau alte obiecte fizice. Einstein s-a străduit foarte mult să găsească contradicții interioare în această teorie cu ajutorul unor exemple și modele rafinate. Niels Bohr și-a dat multă osteneală să respingă aceste atacuri. Despre convorbirile sale cu Einstein el a publicat o dare de seamă captivantă în cartea sa, *Einstein, Philosopher-Scientist* (a se vedea studiul *Teoriile statistice ale lui Einstein*, din această carte).

Pentru ultima oară l-am întâlnit pe Einstein cam în anul 1930. Și deși corespondența noastră nu s-a întrerupt, nu mă simt în drept să vorbesc despre ultima fază din viața și munca lui Einstein. Sper că profesorul Pauli ne va povesti cîte ceva despre aceasta. Îmi închei expunerea cu rugămintea de a-i scuza lungimea. Dar prietenia mea cu Einstein a fost unul dintre cele mai mari evenimente ale vieții mele și „*Ex abundantia enim cordis os loquitur*“ sau cum spunea Martin Luther : „*Wes das Herz voll ist, des läuft der Mund über*“ *.

* În traducere liberă : Cînd te doare, vorbești ; sau preaplinu inimii se revarsă în cuvinte (nu poate fi trecut sub tăcere). *N.T.*

*Dezvoltarea
și natura secolului atomic**

Domnul episcop D. Lilje mi-a făcut marea cinste de a mă invita să vă vorbesc despre secolul atomic, dezvoltarea și natura lui. Cred că aceasta nu trebuie să însemne o prelegere despre descoperirile fizice și aplicațiile lor tehnice, ci o încercare de a prezenta evoluția și acțiunea acestor descoperiri în cadrul istoriei umane. Dar un cercetător al naturii are prea puțin timp pentru studii istorice. Pe de altă parte, de-a lungul vieții mele de peste 70 de ani am participat la o secțiune a istoriei moderne și am meditat asupra ei. De asemenea, am citit sau cel puțin răsfoit tot felul de cărți care mă pot ajuta la aceste meditații. Astfel, îmi amintesc din tinerețe de *Untergang des Abendlandes* (*Declinul Occidentului*) a lui Spengler. Am citit cîte ceva și din uriașa operă a lui Arnold Toynbee și am discutat cîteva lucruri cu el personal, cînd ne-am întîlnit o dată la Edinburgh. Amintesc pe acești doi autori maiolaltă, deoarece amîndoi împrățesc punctul de vedere că în istoria omenirii există regularități și legități care pot fi descoperite prin studiul comparat al diferitelor grupuri de popoare și civilizații. Pe de altă parte, ceea ce cunosc din istoria europeană se bazează în esență pe lectura cărții lui H.A.L. Fisher, *European History*, o carte de concizie și putere de convingere admirabile. În introducerea sa Fisher însă spune următoarele: „Există o satisfacție intelectuală care-mi este refuzată. Oameni mai in-

* Conferință ținută la o întrunire a ziariștilor la Academia evanghelică Loccum, la 21 iunie 1955. Publicat în „Merkur”, 1955, 3.

teligenți sau mai învățați decît mine au descoperit în istorie o temă, un ritm, o ordine prestabilită. Aceste armonii mie nu mi s-au dezvăluit. Eu văd numai că un eveniment neprevăzut urmează după altul, așa cum se rostogolește o undă după alta ; eu văd doar o strașnică stare de fapt, pe care nu se pot întemeia nici un fel de concluzii generale, deoarece ea este unică. Consider că istoricul trebuie să se conducă după o singură regulă certă : desfășurarea istoriei umane este jocul întâmplării și al neprevăzutului. Aceasta nu este nici o doctrină cinică și nici o expresie a deznădejdiei. Progresul ca fapt este clar și înscris cu litere mari în paginile istoriei ; dar progresul nu este o lege a naturii. Terenul pe care l-a cîștigat o generație poate fi pierdut de cea următoare ; gîndurile oamenilor se pot mișca după traiectorii care conduc la catastrofă și barbarie“.

Există așadar două școli teoretice, dintre care una crede că mersul evenimentelor este supus unor legi și are un sens, iar cealaltă neagă aceasta.

Ca cercetător al naturii, sînt obișnuit să caut și să găsesc legile fenomenelor. De aceea, vă cer îngăduință, dacă și în această problemă voi opera cu acest punct de vedere, deși într-un mod cu totul diferit de cum o fac istoricii cități

Începutul unei noi epoci în istorie, de exemplu trecerea de la antichitate la evul mediu, este evident nerecunoscut și nesimțit ca atare de către acei care îl trăiesc. Totul continuă ca și înainte, viața unui fiu nu diferă prea mult de viața tatălui său. Abia istoriografii au găsit diviziuni și perioade pentru a se descurca mai bine în haosul evenimentelor. Chiar și începutul perioadei științelor naturii și industriei în care am crescut noi a fost un proces încet, care s-a întins peste 100 de ani, și abia de a fost observat de oamenii timpului. În prezent lucrurile par altfel. De cîțiva ani a intervenit ceva nou care transformă existența noastră. Acest lucru include simultan o amenințare îngrozitoare și o speranță strălucită : amenințarea autodistrugerii omenirii și speranța unui „paradis pe pămînt“. Și aceasta nu este o revelație a unor profeți religioși sau a unor vizionari filozofici, ci o realitate, noi ne aflăm cu adevărat în fața celor două posibilități pe care

cea mai cumpătată cercetare științifică le pune oamenilor spre alegere. Amenințarea distrugerii este ilustrată prin exemple îngrozitoare — Hiroshima și Nagasaki —, care de fapt ar trebui să fie suficiente. Vreau să spun de la bun început că bombele atomice utilizate acolo erau jucării de copii în comparație cu arma termonucleară care a fost creată între timp. Eu personal n-am participat cu nimic la dezvoltarea acestui capitol din fizică, fizica nucleară, dar știu destul despre ea, pentru a spune că nu este vorba despre o simplă multiplicare a puterii distructive, care lovește un mare număr de nefericiți, dar de care un număr cu mult mai mare de fericiți sînt scutiți, ci de ceva cu mult mai înspăimîntător. Probabil că încă de pe acum stocurile de bombe atomice și cu hidrogen din Statele Unite și Rusia sînt suficiente pentru a distruge reciproc toate orașele mai mari din ambele țări și probabil o dată cu aceasta toate celelalte centre de cultură, deoarece aproape toate țările sînt încadrate într-unul din marile blocuri. Dar ceva cu mult mai rău se pregătește, și poate că este deja gata pentru aplicare; și anume bomba cu cobalt care dezvoltă un praf radioactiv ce se întinde pe teritorii vaste și distruge în calea sa pentru mulți ani, tot ce e viu. Otto Hahn, a cărui descoperire, fisiunea uraniului, a pus în mișcare toată această dezvoltare — fără participarea sa și împotriva voinței sale — a descris de curînd fără înfrumusețări, situația, într-o conferință la radio, și nu am nimic de adăugat la ea. El a amintit apoi și de aplicațiile utile ale fizicii nucleare, producția de energie, fabricarea de izotopi radioactivi pentru utilizare în medicină, tehnică ș.a.m.d. Aceste aplicații firește că pot deveni o dată un mare bine. Dar asta numai dacă viitorul va exista. Ne aflăm în fața unei alternative cum n-a mai întîlnit omenirea niciodată în peregrinărilor sale.

Acest „a fi sau a nu fi“ este însă numai simptomul unui stadiu al dezvoltării spirituale. Trebuie să ne întrebăm: care este cauza mai adîncă a dilemei în care a nimerit omenirea?

Faptul fundamental este descoperirea că materia din care sîntem alcătuiți noi și din care sînt alcătuite toate obiectele nu este mereu aceeași, indestructibilă, ci instabilă, o substanță explozivă. Sîntem așezați cu toții, în ade-

văratul sens al cuvîntului, pe un butoi cu pulbere ; e drept că acest butoi are pereții destul de groși și am avut nevoie de cîteva milenii pentru a-i străpunge. Acum însă, tocmai că am reușit putem fără dificultate să sărim în aer cu ajutorul unui chibrit.

Această situație amenințătoare este pur și simplu o stare de fapt la care voi reveni mai tîrziu și o voi descrie prin expresii ceva mai lămurite. Dar înainte de toate mă frămîntă o întrebare care îmi stă la inimă : oare nu putem să lăsăm butoiul în pace și să ședem pe el liniștiți, fără să ne interesăm de conținutul său ? Sau, renunțînd la parabole, nu putea oare omenirea să trăiască și să prospere fără a cerceta structura materiei și a provoca prin aceasta pericolul autodistrugerii ? Aceasta este o problemă de filozofia istoriei. Permiteți-mi însă, după cum am spus de la început, să o abordez cu modul de a gîndi al unui cercetător al naturii.

Deci lucrurile stau astfel : omul este adesea definit ca animal care gîndește. Dezvoltarea sa se întemeiază pe capacitatea de a aduna experiență și de a acționa corespunzător. Unii indivizi sau grupuri de indivizi arată drumul, ceilalți urmează și învață. Timp de milenii, acest proces a avut loc în mod anonim ; noi nu știm nimic despre oamenii din timpurile străvechi care au descoperit primele arme și unelte de muncă, au învățat creșterea vitelor și agricultura, au dezvoltat limbile. Dar putem avea certitudinea că tot timpul a fost o mare bătălie între puțini înnoitori și mulțimea conservatoare așa cum o observăm de cînd există o transmitere scrisă a tradiției. Numărul total al oamenilor este mare și crește o dată cu fiecare îmbunătățire a condițiilor de viață. Dacă procentul celor înzestrați rămîne aproximativ același, atunci numărul lor crește în același raport ca și numărul total al oamenilor totodată, cu fiecare invenție tehnică crește posibilitatea unor combinații noi. Avem astfel o situație ca în calculul dobînzilor : cînd dobînda este adăugată la capital, acesta crește, deci și dobînzile următoare, și astfel iarăși capitalul, și așa *ad infinitum*. Rezultă ceea ce matematicienii numesc creșterea exponențială. Firește, acest lucru este valabil numai printr-o aproximație grosolană fiind vorba de o lege statistică. Sînt convinși însă că legile statisticii sînt

valabile în istorie, la fel ca la ruletă, în fizica atomică, în astronomia stelară, în genetică etc., adică întotdeauna atunci cînd este vorba de numere mari. Tocmai ceea ce a avut în vedere Fisher cînd scria fraza : „Progresul ca fapt este clar și înscris cu litere mari în paginile istoriei“. La care adaugă „Dar progresul nu este o lege a naturii“. Îmi pare însă că el se bizuie aici pe o idee învechită cu privire la esența legilor naturii, și anume că acestea sînt strict deterministe și valabile fără excepție. Astăzi știm că majoritatea legilor naturii au caracter statistic și admit excepții ; noi, fizicienii, vorbim despre oscilație. Dar și mărimea abaterilor oscilatorii urmează anumite reguli statistice. Mi se pare că istoria obișnuită are de-a face cu aceste oscilații care par haotice și lipsite de sens. (Poate că considerațiile lui Toynbee constituie totuși o încercare de a găsi regularități în oscilații.) Oricum ar fi, din aceste considerente o concluzie îmi pare indubitabilă : procesul cunoașterii și al aplicării celor cunoscute este de nestăvilit.

Dacă însă considerăm numai un spațiu mărginit într-un timp mărginit, de exemplu o națiune sau un grup de popoare într-o perioadă de cîteva veacuri, este posibil ca nimic din aceasta să nu fie vizibil, adesea chiar să aibă loc pierderea celor obținute și regresul ; în schimb, forța spiritului uman se va manifesta pozitiv undeva într-altă parte a lumii, mai devreme sau mai tîrziu. Permiteți-mi să ilustrez aceasta cu cîteva amintiri istorice. Pasul decisiv pe drumul spre fizica atomică a avut loc acum vreo 2500 de ani ; mă refer la meditațiile filozofilor greci ai naturii : Thales, Anaximandru, Anaximene și la atomiștii Leucip și Democrit. Primii care au început să gîndească despre natură, fără să aștepte un avantaj material imediat, din simpla sete de cunoaștere. Ei au postulat existența unor legi ale naturii și au încercat să reducă varietatea materiei la jocul mișcării și așezării unor elemente invizibile și imuabile. Este dificil de lămurit cît de mult s-au abătut aceste gînduri de la ceea ce era uzual pe atunci în tot restul lumii. Împreună cu grandioasa matematică a grecilor, această idee ar fi putut încă atunci să ducă la un avînt științific și tehnic, dacă condițiile sociale ar fi fost favorabile. Dar grecii trăiau într-o lume care se închina armoniei și frumuseții corpului și spiritului ; ei disprețuiau

munca manuală, care constituia o treabă pentru sclavi, și neglijau de aceea experimentul în cursul căruia îți murea dărești mâinile. Astfel, confirmarea empirică a gândirii și valorificarea sa tehnică, care poate ar fi salvat lumea antică de atacul barbarilor, nu au avut loc. După migrațiunea popoarelor, biserica creștină a înălțat un sistem totalitar care respingea orice înnoire. Și totuși, focul aprins de greci continua să ardă mornit. El se ascundea în cărțile care erau păstrate în bibliotecile Bizanțului și a izbucnit ca o flacără vie la învățații arabi, care au creat lucruri esențial noi în matematică și astronomie și au păstrat tradițiile grecești pînă ce timpurile s-au copt. Bizantinii refugiați în Italia din fața turcilor au adus cu cărțile lor nu numai cunoașterea antichității clasice, dar și ideea de cercetare. Și așa a venit timpul descoperirilor și invențiilor, care au asigurat predominanța Europei pentru cîteva secole. O dezvoltare paralelă, care poate că are origini și mai vechi, a avut loc în China; eu știu puțin în această privință, dar există o lucrare amplă a lui Needham, biologul din Cambridge, care tratează problema în mod amănunțit. Dar în timpul Renașterii europene și după aceea, China era tocmai într-o stare de liniște sau de stagnare, și astfel s-a făcut că timp de cîteva secole Europa a avut întîietatea. Am avut destui elevi chinezi, precum și japonezi și indieni, pentru a ști că ei nu rămîn în urma noastră prin nimic în ce privește înzestrarea științifică.

Din aceste considerente rezultă două concluzii.

În primul rînd, este cu totul lipsit de sens să se creadă că în existența omenirii putea fi evitată criza sau, cum se spune, venirea erei atomice, sau că dezvoltarea mai departe a cunoașterii periculoase ar putea să fie prevenită. Biserica catolică l-a ars de viu pe Giordano Bruno și l-a judecat pe Galilei, ceea ce a dus la depășirea tinerei școli științifice italiene de către școlile franceză, olandeză și engleză. Hitler a încercat să înăbușe „fizica iudaică” fără nici un succes, spre propria sa pagubă. Există și alte exemple din vremuri mai apropiate.

În al doilea rînd, apariția bruscă a situației critice se întemeiază pe o eroare de perspectivă. Cunoașterea naturii și puterea care rezultă din aceasta cresc în permanență, chiar dacă au loc fluctuații și regresii, dar în

medie cu o accelerație în continuă creștere, caracteristică proceselor care se autoalimentează. Astfel, trebuia odată să se întâmple ca modificarea condițiilor de trai produse de acest proces să se petreacă în viața unei singure generații și, prin urmare, să apară ca o catastrofă. La aceasta se adaugă complicațiile care se bazează pe faptul că există popoare care nu au participat la evoluția tehnică și trebuie să se adapteze la ea fără pregătirea corespunzătoare.

Generația noastră este aceea care recoltează ceea ce au semănat atomiștii greci. Rezultatul final este confirmarea ideii lor fundamentale, faptul că lumea materială constă în esență din protoparticule egale, a căror dispoziție și influență reciprocă generează întreaga varietate a fenomenelor. Dar, firește că acest tablou simplu nu este suficient și pînă la urmă este mult complicat printr-o grămadă de descoperiri.

Protoparticulele se numesc nucleoni; ei se unesc în formațiuni infim de mici, nucleii atomici. În primul rînd, atomii chimiștilor nu sînt de loc indivizibili, cum o spune numele lor, iar în al doilea rînd nu sînt, după cum s-a crezut, toți identici pentru un anumit element chimic. Aceasta pentru că nucleonii pot fi sau încărcăți electric pozitiv, și atunci ei se numesc protoni, sau lipsiți de sarcină electrică, în care caz se numesc neutroni. Atomii chimici sînt formați dintr-un nucleu care este o compoziție densă de neutroni și protoni, deci încărcăți electric pozitiv, și dintr-un nor de particule cu electricitate negativă foarte întins în raport cu nucleul electronic. Electronul are o masă foarte mică, dar aceeași sarcină ca protonul, cu semn schimbat. Norul electronic poartă de grijă ca întregul atom să fie electric neutru și el este acela care determină comportarea chimică și majoritatea proprietăților fizice evidente ale atomului. Atomii care au același număr de protoni, deci și de electroni, sînt indiscernabili din punct de vedere chimic și al fizicii uzuale, chiar dacă numărul neutronilor din nucleu ar putea să fie diferit; asemenea atomi aproape identici, dar de greutate diferită, se numesc izotopi.

Elementele chimiei și fizicii uzuale sînt amestecuri de izotopi. Legile care determină structura învelișului electronic sînt în principiu cunoscute; cercetarea actuală se

îndreaptă spre stăpînirea unor cazuri tot mai complicate. În schimb, în fizica și chimia nucleelor, structurile și legile lor sînt departe de a fi în aceeași măsură cercetate. Dar se poate considera cu deplină certitudine că și acolo sînt valabile cîteva din legile fizice generale, din care se pot trage concluzii foarte adînci. Principala dintre aceste legi este aceea care exprimă echivalența dintre masa (M) și energia (E), prin formula des citată $E = Mc^2$, unde c este viteza luminii. Ea a fost stabilită exact acum 50 de ani în toată generalitatea ei de către Einstein, pe bază de considerente relativiste cu mult înainte de a fi existat vreo posibilitate de verificare. Numărul c , considerat în unități uzuale, adică cm/s, este foarte mare, un 3 urmat de 10 zerouri; deci $c^2 = c.c$ este imens, un 9 cu 20 de zerouri. De aceea, la toate transformările uzuale ale energiei modificarea corespunzătoare a masei ($M = E/c^2$) este extrem de mică. În principiu, un ceasornic devine ceva mai greu atunci cînd este întors, dar aceasta este complet nemăsurabil. Altfel stau lucrurile în cazul transformărilor nucleare, unde intră în joc energii uriașe.

O porțiune de zid formată din 100 de cărămizi egale, fără mortar, cîntărește exact de 100 de ori cît o singură cărămidă, cu mortarul corespunzător în plus. Aproximativ același lucru este valabil și pentru nucleoni: un nucleu format din 100 de nucleoni cîntărește aproximativ de 100 de ori mai mult decît un nucleon singur. Am accentuat că numai aproximativ, deoarece există abateri, deci trebuie să existe un fel de mortar. Oricît de ciudat ni s-ar părea, acesta are o greutate ca să zicem așa negativă: nucleul este mai ușor decît suma componentelor sale. După Einstein, mortarul în acest caz este tocmai acea energie de legătură care se pierde cînd părțile se unesc. Aceste defecte de masă fiind considerabile, energiile corespunzătoare sînt extraordinar de mari.

Elementul cel mai ușor, hidrogenul, constă în esență dintr-un singur izotop, protonul unic. (Există și izotopi de hidrogen cu unul sau doi neutroni auxiliari). Elementul următor, heliul, constă în mod preponderent dintr-un izotop format din doi protoni și doi neutroni. La unirea acestora se eliberează energie, foarte multă energie. Procesul nu are însă loc în mod spontan, înainte de a fi învins un

anumit obstacol. Pentru a reuni cele patru particule, trebuie să se cheltuiască energie. Situația este identică cu a unui baraj care trebuie deschis sau depășit, pentru ca apa să se reverse și să poată efectua un lucru mecanic. La fel se întâmplă și cu elementele următoare : toate sînt nestabile, și s-ar uni dacă n-ar fi barajele de reținere, din ferice baraje foarte puternice, care se opun. Pînă la mijlocul sistemului elementelor, cam pînă la fier, situația este aceeași ; de aici încolo lucrurile se inversează : fiecare nucleu are tendința de a se descompune, și doar un baraj de reținere îl împiedică. Ultimul dintre elementele care se găsesc în natură, uraniul, are barajul cel mai slab, și ca atare a fost elementul care a reușit să fie descompus pentru prima dată în anul 1938 în experimentele lui Hahn și ale colaboratorului său Strassmann. Drumul de la aceste delicate încercări de laborator pînă la primul reactor cu uraniu, pe care l-a înființat Fermi la Chicago în 1942, a pretins un consum uriaș de ingeniozitate, îndrăzneală, îndemînare, organizare și bani. Nu se putea prevedea de loc că fisiunea unui nucleu de uraniu printr-un neutron va fi însoțită de emiterea de noi neutroni, care vor produce o avalanșă de fisiuni, o reacție în lanț ce se întreține singură.

Dar natura a organizat astfel lucrurile încît oamenii au descoperit acest fenomen îndată ce au avut la dispoziție mijloacele necesare. Iar faptul că le-au stat la dispoziție aceste mijloace a fost o consecință a războiului. Realizarea tehnică pînă la prima explozie atomică din 16 iulie 1945 a ținut trei ani și a costat o jumătate de miliard de dolari.

Procesul invers al formării nucleelor mai mari din altele mai mici (heliu din hidrogen) este sursa energiei solare și a tuturor stelelor. În centrul lor domnesc stări de temperatură și de presiune atît de înalte încît este posibilă unirea a patru nucleoni într-un nucleu de heliu, prin pași care trec peste reacțiile intermediare. Același lucru s-a reușit acum să se facă și pe pămînt, folosind ca focos o bombă de uraniu. Astfel, avem acum bomba H.

Așadar, lucrurile nu stau altfel decît am spus-o de la început ; întreaga materie este nestabilă. Dacă n-ar fi așa, stelele n-ar străluci, n-ar exista căldură solară, n-ar exista viața pe pămînt. Stabilitatea și viața sînt incompatibile.

De aceea, viața este totdeauna o aventură care poate să se încheie bine sau rău. Problema care se pune astăzi este ca marea aventură a omenirii să fie orientată spre bine.

Să spunem la început câteva cuvinte despre binele care poate fi atins în cazul unei comportări rezonabile. În primul rînd, este problema generării de energie. Pe cînd eram tînr, se aprecia că pînă la epuizarea resurselor de cărbune vor trece cîteva secole ; pe atunci petrolul nu era folosit încă pe scară întinsă.

Între timp, s-au ars cantități imense de cărbune, s-au descoperit și s-au consumat cantități imense de petrol ; totuși, se mai apreciază că durata rezervei este de aproximativ 400 de ani. Se pare așadar că nu este atît de urgentă crearea unor surse noi de energie. Numai că această concluzie nu este de loc corectă. Cărbunile și petrolul nu sînt numai surse de energie, ci și cele mai importante materii prime pentru nenumăratele produse chimice. Gîndiți-vă numai la materialele plastice. Deasemenea creșterea numărului oamenilor va pune o dată sub semnul întrebării alimentația prin produse agrare ; atunci va fi necesar ca chimia să creeze înlocuitori, pentru care firește materia primă va fi tot cărbunile. Este așadar o barbarie să ardem cărbune și petrol. Apoi, nu se poate trece cu vederea latura socială a chestiunii. Nu mai este departe ziua cînd în țările civilizate se vor găsi cu greu muncitori care să se dedice profesiei întunecoase și periculoase de miner, cel puțin nu pentru salariul suportabil din punct de vedere economic. Se pare că Anglia se apropie de pe acum de această stare. În aceste condiții pentru țările care nu au nici cărbune, nici petrol, combustibilul nuclear ușor transportabil va fi o binefacere.

În continuare, trebuiesc amintite aplicațiile produselor radioactive secundare ale reactorilor atomici. Se produc izotopi nestabili, adică radioactivi, a tot felul de elemente, care pot fi utilizați ca surse de radiații, în locul radiului, care este atît de scump, în medicină, în tehnică, în agricultură, de exemplu la tratarea cancerului, la încercările materialelor, la producerea de noi specii de plante prin mutații etc. Prin adaosul unor cantități infime de izotopi radioactivi, se poate demonstra și localiza prezența unor

elemente în organisme vii cu ajutorul radiațiilor emise.

Toate acestea și ceea ce poate rezulta din ele în viitor sînt lucruri mari. În luna august a acestui an (1955), o conferință internațională convocată de O.N.U. se va ocupa pentru prima oară cu problema exploatării în comun a tuturor acestor posibilități. Eu nu sînt specialist în fizică nucleară și nu voi participa. Sper însă că se vor obține rezultate însemnate. Dar mă întreb dacă chiar un paradis tehnic poate fi considerat o contrapondere față de nenorocirea bombei atomice? Cînd am întrebuintat cuvîntul „paradis“, m-am referit în orice caz la ceva mai mult decît la progresul tehnic, am avut în vedere realizarea eternei dorințe a omului de „pace pe pămînt“.

Pentru ceea ce vreau să spun acum nu mă pot bizui pe cunoștințele mele de fizician și nici pe studiile mele sporadice în domeniul istoriei, ci numai pe judecata sănătoasă a omului și pe comunitatea de vederi cu o serie de prieteni, specialiști de frunte din diferite țări. Noi sîntem încredințați că un război între marile puteri — nu mai sînt în prezent decît două sau trei — a devenit o imposibilitate sau cel puțin va deveni într-un viitor apropiat, căci el înseamnă, după cum am spus-o de la început, probabilitatea unei distrugerii generale nu numai a participanților, ci și a neutrilor. În noile condiții războiul nu mai este, cum spunea Clausewitz, continuarea politicii cu alte mijloace, ci o nebunie. Și dacă omenirea nu este capabilă să renunțe la acest mijloc, atunci denumirea ei zoologică nu trebuie să fie derivată din *sapientia*, ci din *dementia*.

Se pare că această situație este binecunoscută principalilor oameni de stat. Atenuarea războiului rece, pe care îl trăim acum, este desigur un semn că așa stau lucrurile. Peste tot se caută apropieri și tratative, de teama grozăvicii pe care ar putea s-o dezlănțuie un conflict armat. Dar teama este un temei prost pentru înțelegere și pentru rezolvarea conflictelor. Oare nu este posibil ca pacea întemeiată pe teamă, spre care ne îndreptăm probabil în prezent, să poată fi înlocuită cu ceva mai bun și mai cert?

N-am nimic împotrivă să rîdeți de mine
Ca de un Palmström, care recuză penibilul ;
Pentru că — conchide el tăios,
Ceea ce nu trebuie să fie, nu poate fi,

asa cum se spune în „Cîntecele de spînzurătoare“ (*Galgenliedern*) ale lui Morgenstern*.

Dar eu nu sînt singurul care am aceste idei. Einstein le împărtășea; s-a exprimat clar în această privință cu puțin timp înainte de moarte. Apoi Bertrand Russell, marele filozof englez, care își pune inegalabilul talent oratoric în serviciul acestei cauze, și mulți alții. Poate că apar ca visători, totuși ei sînt cei care transformă lumea. Numai că astăzi nu dispunem de mult timp; este necesar ca această generație a noastră să fie în stare să-și transforme gîndirea. Dacă nu e capabilă, atunci zilele omenirii civilizate sînt numărate. Chiar dacă pînă la urmă totul se va încheia cu bine, drumul va trece foarte, foarte aproape de prăpastie.

Căci lumea este plină de conflicte care par de nerezolvat: frontiere deplasate, populații izgonite, antagonisme de rasă, de limbă, de religie, falimentul sistemului colonial și, în sfîrșit, antagonismul de neîmpăcat dintre ideologiile economico-filozofice — capitalismul și comunismul. Se poate oare spera ca toate aceste încordări să fie rezolvate fără folosirea violenței?

Nu cumva în locul pretenției radicale de a renunța la război este mai bine să se încerce, prin convenții internaționale, împiedicarea folosirii noilor arme destructive?

Mic și prietenilor mei această idee ni se pare inaplicabilă, și anume din următoarele considerente. Producția de energie prin reacție nucleară pentru scopuri pașnice se întreprinde și se desăvîrșește peste tot. Un sistem de supraveghere destinat a împiedica producția mijloacelor destructive poate să funcționeze numai atît timp cît domnește pacea. Dacă însă se dezlănțuie un război între marile puteri, dus la început cu arme „convenționale“, atunci controlul încetează. Oare un popor ajuns la ananghie și care totuși își închipuie că se poate salva prin bomba atomică va renunța la ultimul mijloc, chiar dacă există pericolul ca el însuși să sufere cel mai mult de pe urma ei?

* CHRISTIAN MORGENSTERN, poet german, influențat de neoromantism, care a publicat cîteva mici volume de versuri grotești sub titlul *Galgenliedern* (Cîntece de spînzurătoare), în care și-a înfățișat, prin intermediul a două personaje stranii Palmström și Kroff, ideile sale filozofice.

În ce privește armele „convenționale”, îmi vine acum greu să pricep de ce nu sînt întîmpinate cu aceeași groază și cu același refuz care astăzi e îndreptat împotriva armelor atomice. De mult nu mai sînt nici ele mijloace „cinstite” de luptă între soldați, ci mijloace distructive, care nu fac alegere. Ele nu se îndreaptă numai împotriva obiectivelor militare, ci împotriva întregii organizări și capacități de producție a statului inamic, împotriva fabricilor, căilor ferate, locuințelor, ele ucid fără alegere pe cei fără apărare, bătrîni, femei și copii, ele distrug cele mai nobile bunuri culturale, biserici, școli, monumente, muzee, biblioteci, neținînd seama de vechime sau de imposibilitatea de a fi înlocuite. Din punct de vedere moral, pasul hotărîtor al ducerii războiului spre barbaria modernă a fost conceptul de război total. Chiar fără bombe atomice, perspectivele bombelor uzuale, ale otrăvurilor chimice și bacteriologice sînt destul de înspăimîntătoare. Interzicerea numai a armelor atomice nu este justificată nici practic, nici etic. Omenirea se poate salva numai prin renunțarea la folosirea violenței militare în general. În prezent, teama a generat în adevăr o asemenea stare de pace precară. Se pune problema de a o stabili prin revenirea la rațiune, pe baza principiilor morale care fac posibilă conviețuirea oamenilor. Hristos ne-a învățat cum trebuie să se comporte omul față de om. Pînă acum popoarele au acționat astfel (iar bisericile nu s-au opus) ca și cum aceste porunci ar fi valabile numai în interiorul frontierelor lor naționale și nu în sfera relațiilor dintre ele. Aici este rădăcina răului. Putem supraviețui numai dacă în relațiile internaționale neîncrederea va fi înlocuită prin înțelegere, invidia, prin disponibilitatea pentru într-ajutare, ura, prin dragoste. În vremea noastră, și sub ochii noștri, doctrina non-violenței a ieșit victorioasă datorită unui necreștin, Mahatma Ghandi, care și-a eliberat țara fără vărsare de sînge. Oare de ce n-ar fi posibil ca acest exemplu să fie urmat peste tot ?

Nu pot face nici o propunere pentru rezolvarea conflictelor propriu-zis politice. Aș vrea să prezint doar cîteva puncte de vedere generale.

Primul este că un număr uriaș de oameni din toate țările sînt interesați în pregătirea și, în caz de nevoie, în

declanșarea războiului. Sînt marile industrii, care cîștigă de pe urma lui, numeroși bărbați cărora le place viața de soldat, cu romantismul ei tradițional, și care sînt bucuroși să se supună cuiva, fără a trebui să adopte ei înșiși decizii pline de răspundere ; sînt ofițeri, generali, amirali, mareșali ai aerului, a căror profesiune este războiul. Ei sînt aceia care îi consiliază astăzi pe oamenii politici. În sfîrșit, sînt fizicienii, chimiștii și inginerii care inventează și produc arme noi. Ar fi o iluzie de a voi stabilizarea păcii fără a ține seamă de acești oameni, fără a le da ceva care să le compenseze pierderea. Cum trebuie făcut acest lucru nu pot s-o spun decît pentru o categorie, fizicienii, pe care îi cunosc bine. Aici mi se pare că nu există o dificultate prea mare. Adesea se aud cuvinte destul de grele despre fizicienii atomiști : toate nenorocirile provin de la acești iresponsabili atleți ai creierului ; nu numai bomba atomică, ci și vremea rea. M-am străduit să arăt că dezvoltarea spiritului uman or cum trebuia să conducă o dată cu o necesitate la descoperirea și folosirea energiei înmagazinate în nucleul atomic. Faptul că acest lucru s-a produs atît de rapid și atît de temeinic, faptul că a dus la o situație critică este consecința unei întîmplări istorice tragice : descoperirea fisiunii uraniului a avut loc tocmai în țara și în timpul în care Hitler era la putere. Împreună cu mulți alții, a trebuit atunci să părăsesc Germania și am văzut cu ochii mei ce spaimă a cuprins restul lumii cînd primele succese ale lui Hitler au lăsat să se întrevadă posibilitatea ca el să subjuge toate popoarele pămîntului. Fizicienii alungați știau că n-ar fi existat nici o salvare dacă germanii ar fi reușit primii să producă bomba atomică. Insuși Einstein, care a fost pacifist în cursul întregii sale vieți, a împărtășit această teamă și s-a lăsat convins de către unii tineri fizicieni maghiari ca să-l pună în gardă pe președintele Roosevelt. Aceștia, și alți savanți emigrați din Europa centrală, în primul rînd Enrico Fermi, unul dintre cei mai mari fizicieni ai timpului nostru, la fel de înzestrat în experiment și în teorie, au o mare contribuție la realizarea proiectului „Uran“ a cărui conducere a rămas ce-i drept în mîna americanilor. Mi se pare că oamenilor care au construit bomba atomică nu li se poate face nici un reproș decît doar din punctul de vedere

al pacifismului celui mai extremist, care propovăduiește ca nici o dată să nu fie întrebuințată violența, nici măcar împotriva celui mai mare rău. În ce privește aruncarea bombei în Japonia, lucrurile stau altfel. Eu consider că aceasta este o barbarie și totodată o nebie. Iar răspunderea pentru ea o poartă nu numai oamenii de stat și militarii, dar și un mic grup de patru fizicieni care au fost consilierii comitetului împuternicit de către președintele Truman. Unul dintre ei, Fermi, a murit între timp. Un altul, Compton, a renunțat la orice activitate în domeniul fizicii din motive de conștiință; el a devenit președintele unui mare institut educativ și se consacră luptei împotriva utilizării abuzive a armelor atomice. Ceilalți doi nu și-au schimbat în fond modul de viață și activitatea, și probabil nici vederile lor cu privire la necesitatea folosirii bombei în Japonia. Dacă vreți să pătrundeți în psihologia fizicienilor atomiști, atunci citiți cartea inteligentă și amuzantă scrisă de LAURA FERMI, văduva fizicianului, *Atoms in the Family*. Ultimul capitol se numește „A New Toy, the Giant Cyclotron” (O nouă jucărie, ciclotronul gigant). Cuvîntul *toy* (jucărie) este semnificativ, chiar dacă poate este exagerat. Acești oameni, absorbiți de problemele a căror rezolvare îi face să triumfe, meditău prea puțin la consecințele rezultatelor. Și chiar dacă o făceau, o făceau cu sentimentul că nu pot avea nici o influență în această privință. Ideea de a renunța la cercetare, pentru că ar putea să aibă consecințe periculoase, li se pare absurdă: căci dacă ei ar înceta, s-ar găsi destui alții care ar continua; dacă n-ar fi americanii în frunte, atunci ar fi rușii. Și toți, cu puține excepții, au revenit după război la activitatea pașnică, la cercetare și învățămînt fără să-și dorească altceva mai bun. Și din rîndurile lor s-au organizat asociații, cu scopul de a discuta răspunderea socială a cercetătorului naturii și de a lua atitudine împotriva utilizării abuzive a științei.

Firește că există și cîțiva fizicieni lacomi de sînge; ei au gustat din putere, sînt vanitoși și vor să-și păstreze influența pe care au cîștigat-o în timpul războiului. Dar în ansamblu, cred că ideea politicii lipsite de violență va întîmpina la cercetătorii naturii mai puțină rezistență decît la alte grupuri sociale.

În orice caz, mai mult depinde de dumneavoastră, ziaristii, dumneavoastră reprezentați opinia publică, dar o și conduceți. Pentru mine, este o mare satisfacție că mi s-a dat posibilitatea de a face apel la dumneavoastră. Vă este la îndemână, aproape în mai mare măsură decît oamenilor de stat, să propagați spiritul de toleranță, spiritul înțelegerii, al disponibilității pentru într-ajutorare — condiții preliminare pentru dăinuirea omenirii civilizate. Practic vorbind, aceasta înseamnă înlăturarea tuturor lozincilor și epitetelor înjositoare, dictate de suspiciune, cum ar fi cuvîntul oribil de „ofensivă a păcii“. Din păcate, astăzi în lumea occidentală sînt puține ziare care să comunice cititorilor știri obiective ; este uzual ca ele să fie interpretate prin articole ale unor oameni care se dau drept experți, pentru că presimt o semnificație ascunsă în spațele fiecărui cuvînt al părții opuse. Că așa se întîmplă și în lumea răsăriteană nu este o scuză. Eu pledez pentru a schimba această situație. Căci, după cum se ostenește să repete Bertrand Russell ; unica alegere pe care o avem este între coexistență și nonexistență. Permiteți-mi să închei cu cuvintele sale (în traducerea mea) : „În lumea mare a stelelor și în lumea mică a atomului omul a dezvăluit taine care puteau fi considerate ca dincolo de cognoscibil. În artă și literatură precum și în religie oameni aleși au arătat o măreție a sentimentelor care dă speciei umane dreptul la perpetuare. Să se termine oare toate acestea printr-un dezastru numai pentru că sînt atît de puțini cei capabili să se simtă oameni, în loc de a se considera cutare sau cutare grup de oameni ? Este oare generația noastră atît de săracă în înțelepciune, atît de inaptă de a iubi, atît de oarbă chiar față de cele mai simple cerințe ale automenținerii, încît ultima dovadă a stupidei sale inteligențe să fie nimicirea oricărei vieți de pe planeta noastră ? Căci nu numai oamenii vor pieri, ci și animalele și plantele, pe care nimeni nu le poate acuza de a fi comuniști sau anticomuniști. Nu pot să cred că acesta va fi sfîrșitul“.

Dacă cu toții vom refuza să credem aceasta și dacă vom acționa în mod corespunzător, atunci nu va exista acest sfîrșit.

Multe s-au schimbat în fizică în cursul celor două decenii pe care eu le-am petrecut în străinătate. Ea nu mai este știința calmă și pură de altădată, ci un factor decisiv în politica de forță a statelor. Revoluția pe care a produs-o descoperirea de către Hahn a fisiunii uraniului eu am trăit-o doar ca spectator. Mi se pare că fizicienii din Germania sînt mai puțin conștienți de această situație cu totul schimbată decît cei din țările anglo-saxone. Acolo nimeni nu poate evita problemele de conștiință cu privire la întrebarea cît de departe vrea să ajungă prin colaborarea la dezvoltarea unor forțe care pun în pericol existența lumii civilizate. M-am întrebat adesea cum s-ar fi comportat în aceste condiții lordul Rutherford, adevăratul întemeietor al fizicii nucleare. El era desigur un patriot, și în timpul primului război mondial a contribuit la apărarea patriei sale. Dar cunoștea îngrădiri. Cînd am venit în 1933 la Cambridge, era acolo și Fritz Haber, bolnav și zdrobit sufletește de surghiun. Am încercat să-i aranjez o întîlnire cu Rutherford ; dar acesta a refuzat să strîngă mîna celui care a inițiat războiul chimic. Cum s-ar fi comportat el astăzi ? Poate că forța personalității sale ar fi reușit să împiedice transmiterea necondiționată către politicieni și militari a noilor mijloace de distrugere. În America, liderii fizicii au încercat acest lucru, dar fără succes. Actul prin care ei puneau în gardă guvernul în ce privește utilizarea bombei atomice împotriva centrelor urbane de mare aglomerație și preziceau cu exactitate consecin-

* „Physik. Blätter“, 11 (1955), p. 1.

tele politice și morale este cunoscut sub numele de „Raportul Franck“, după numele președintelui său, vechiul meu prieten James Franck.

În America și în Anglia s-au întemeiat asociații al căror scop este elucidarea problemei răspunderii sociale a omului de știință. Menționez societatea americană „Society for Social Responsibility in Science“ (S.S.R.S.), al cărei membru sînt. Această asociație își informează membrii printr-un buletin lunar („Newsletters“), care relatează despre discuții, discursuri, publicații și cărți, dă extrase din ele și publică declarații ale unor personalități marcante — bărbați și femei — și, în fine, scrisori ale cititorilor. În ultimul număr se află extrase dintr-o scrisoare a lui Albert Schweitzer către ziarul „Daily Herald“, din Londra, cu privire la bomba cu hidrogen și tezele principale dintr-o conferință (*In Memoriam Alex Wood 1954*) a profesoarei Kathleen Lonsdale, binecunoscuta cristalografă, una dintre primele femei ajunse membră a Societății Regale de Știință (Royal Society). Ea este *quaker* și pionieră a luptei împotriva utilizării descoperirilor științifice în scopuri inumane și în slujba politicii de forță, avînd un rol de frunte în asociațiile engleze care luptă pentru asemenea țeluri și își propagă idealurile în întreaga lume.

După cîte știu eu, în Germania nu există deocamdată o asemenea organizație, și aceasta este firesc în lumina restricțiilor impuse oamenilor de știință germani prin statutul de ocupație. A venit însă timpul cînd, o dată cu încetarea acestei constrîngerii, apare o nouă răspundere și, o dată cu ea, necesitatea elucidării acestor probleme. Mi se pare că asociațiile germane de fizică ar putea să fie un for pentru asemenea discuții¹. Aici nu este vorba numai de probleme fundamentale, cum ar fi de exemplu, luarea de poziție față de război în general și față de folosirea mijloacelor de distrugere care amenință existența unor populații întregi sau chiar a întregii omeniri civilizate, ci este vorba și de probleme mai mărunte dar totuși impor-

¹ Între timp, aceasta s-a manifestat foarte clar la Conferința fizicienilor de la Wiesbaden din 1955.

tante, care privesc poziția omului de știință față de societate. Extrag unele puncte :

Amenințarea libertății științei prin controlul militar al cercetării și limitarea publicării ; goana după spioni, așa cum are ea loc în prezent în America ; organizarea a numeroase laboratoare de stat bine înzestrate, datorită cărora un număr tot mai mare de oameni de știință își pierd independența ; și în fine, marea întrebare dacă cercetătorul care obține rezultate bune trebuie să rămână totdeauna doar o slugă pricepută sau dacă el trebuie să participe cu spirit de răspundere la deciziile importante.

În puținii ani care s-au scurs după prăbușire, fizica germană a depus eforturi deosebite în vederea reconstrucției mijloacelor sale de cercetare și predare. Fie ca ea să folosească cu aceeași energie intervalul de timp, scurt, care i-a mai rămas până la libertatea totală de acțiune, urmărindu-și la fel de conștient scopul de a elucida problemele morale și sociale care i se impun fizicianului ca om și ca cetățean în urma propriilor sale cercetări. Dacă se va întârzia cu acest lucru, atunci libertatea științei va fi tot atât de mult amenințată ca și libertatea cetățenească a fiecărui om de știință în parte. Iar această problemă a răspunderii este tot atât de internațională ca știința însăși. De aceea, ar fi foarte de dorit ca grupările care o discută, în diferite țări, să se unească.

Albert Einstein
*și cuantele de lumină **

Invitația de a vorbi aici cu prilejul celei de-a 50-a aniversări a apariției primei lucrări a lui Einstein despre cuantele de lumină, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (Despre un punct de vedere euristic cu privire la apariția și transformarea luminii), constituie pentru mine semnul unei înalte prețuiri și am considerat ca o datorie de onoare acceptarea ei. Căci în primul rînd prietenia mea cu Einstein are o vechime de aproape o jumătate de veac, iar în al doilea rînd la Berlin a fost prima universitate în care am funcționat ca profesor și unicul loc unde am lucrat cîțiva ani alături de Einstein, și am fost în permanentă legătură cu el. Mai apoi, am avut și ezitări. Cînd acum un an și jumătate m-am retras de la catedra din Edinburgh, din cauză că am atins limita de vîrstă, m-am hotărît să nu mai particip activ la știința fizicii (cu excepția încheierii a două cărți pe care le începusem cu mult înainte și dintre care una a apărut între timp) ; m-am retras într-un loc liniștit, fără universitate și fără bibliotecă, și am vîndut majoritatea propriilor mele cărți și reviste. Așadar, îmi lipsește orice instrument bibliografic pentru a-mi împrăști memoria. Și totuși, n-am vrut să mă sustrag invitației. Au mai rămas în viață doar puțini specialiști în fizica teoretică care au fost contemporani cu marea și zbuciumata dramă a apariției fizicii moderne.

* Comunicare ținută la 18 martie 1955 la ședința festivă a Societății de fizică din Berlin, consacrată aniversării a 50 de ani de la apariția lucrărilor fundamentale ale lui Einstein. Publicată în „Die Naturwissenschaften“, 42 (1955), p. 425.

Deci, dacă vreți să acceptați faptul că povestirea mea se bazează în esență pe amintiri și în unele privințe poate să nu fie exactă, atunci voi încerca să evoc primii ani ai acestui secol în fizică și contribuția lui Einstein la dezvoltarea ei, îndeosebi ideea cuantelor de lumină.

În același an 1905 și în același volum al publicației „Annalen der Physik” au apărut și celelalte două lucrări fundamentale ale lui Einstein: una cu privire la teoria relativității, cealaltă, despre mișcarea browniană. Oricât de deosebite ar părea aceste teme, există totuși o anumită legătură între ele. Mai ales teoria lui Einstein cu privire la fluctuații și mișcarea browniană se bazează pe considerente cu totul analoge cu cele pe care le-a folosit pentru fundamentarea ideii cuantelor de lumină. Voi încerca să lămuresc aceasta ca pe un exemplu al aspirației spre o concepție unitară, atotcuprinzătoare a naturii, care a condus gândirea lui Einstein pînă în ziua de astăzi.

Permiteți-mi să încep cu cîteva cuvinte despre antecedentele personale ale lui Einstein și brusca sa apariție, ca o nouă stea pe firmamentul fizicii.

El s-a născut la 14 martie 1879, la Ulm. Părinții săi s-au mutat în curînd la München, iar mai tîrziu la Pavia, în Italia; el, personal, a rămas la liceul Luitpold, din München, dar școala i s-a părut atît de abrutizantă, încît a părăsit-o de la sine putere în 1894, fără examen de absolvire, și a plecat la Milano, la părinții săi. Aceeași pornire spre independență l-a determinat să părăsească apoi comunitatea religioasă evreiască și să renunțe la cetățenia germană. În 1895 a plecat în Elveția și a fost primit la școala cantonală din Aarau, unde sufla un vînt de libertate și unde a găsit prieteni însuflețiți de aceleași sentimente și convingeri.

După examenul de absolvire, el a intrat, în 1896, la Școala superioară tehnică confederală de la Zürich, pentru a studia matematica și fizica. Printre profesorii săi se afla Hermann Minkowski, care mai tîrziu a contribuit în mod decisiv la desăvîrșirea teoriei relativității. Minkowski mi-a fost și mie profesor (la Göttingen) și, după apariția lucrării lui Einstein despre relativitate, mi-a spus o dată: „De fapt, nu i-aș fi încredințat aceasta lui Einstein”. În anul 1900 Einstein și-a susținut examenul de diplomă.

pentru titlul de profesor, dar a avut dificultăți în ce privește găsirea unui post. Cîțva timp el a fost profesor auxiliar la Winterthur și Schaffhausen, pînă ce în 1902 a fost angajat ca „expert de clasa a III-a” la „Administrația confederală pentru proprietatea spirituală”, din Berna, biroul elvețian de patente. După privațiunile suferite în anii cînd a fost elev și student, venitul mărunț, dar sigur, i s-a părut o izbăvire, și cele opt ore zilnice, pe care trebuia să le petreacă la biroul cu fadele cereri de brevet, nu l-au împiedicat să-și continue preocupările de fizică și filozofie. În aceste condiții, departe de agitația unei instituții de învățămînt, au apărut toate acele mari lucrări ale sale. Cînd, peste mulți ani, ceream ajutorul său în vederea găsirii unui post pentru cîte un elev înzestrat, căpătăm de obicei un răspuns avînd aproximativ următorul conținut: „Lasă-l să devină cizmar sau lăcătuș; dacă știința îi stă în sînge și dacă e bun la ceva, își va găsi singur drumul”. Totuși, ajuta ori de cîte ori putea. Dar ideea că setea de cunoaștere nu trebuie să aibă nimic comun cu cîștigarea pîinii zilnice nu l-a părăsit niciodată, și astăzi el o împărtășește mai viu decît oricînd, deși din alte motive, asupra cărora voi reveni.

În același an 1900, în care Einstein își dădea la Zürich examenul său de diplomă, Max Planck comunica la „Societatea germană de fizică” formula sa asupra radiațiilor (pe data de 19 octombrie) [1] și interpretarea sa teoretică cu ajutorul ipotezei cuantelor (la 14 decembrie) [2]. Despre impresia produsă de aceste comunicări nu pot să vă spun nimic din experiența mea personală, pentru că pe atunci eram încă la școală și mă pregăteam pentru examenul de bacalaureat. În toamna anului 1901 mi-am început studiile, dar nu m-am îndreptat de la început spre matematică și fizică, ci am studiat domenii foarte eterogene ca zoologia, economia politică, astronomia și filozofia. Chiar și în anii următori, cînd am audiat renumiți matematicieni la Breslau, Heidelberg, Zürich și Göttingen și m-am ocupat întrucîtva și de fizică, deși am aflat, mai ales de la Minkowski, despre dificultățile existente în electrodinamica corpurilor în mișcare, care apoi au condus la teoria relativității, despre cuante nu aflasem mai nimic. Acestea erau lăsate încă pe seama specialiștilor în radia-

ția calorică. Și, în ciuda confirmării experimentale a formulei radiației a lui Planck, cuantele erau considerate ca o ipoteză ciudată, ad-hoc, care nu era luată prea în serios.

Einstein însă a luat-o în serios. El era mai mare decât mine doar cu patru ani, dar în ce privește vârsta intelectuală (cum spun psihologii), probabil cu opt ani sau chiar mai mult. Între 12 și 16 ani el și-a însușit din cărți calculul diferențial și integral și a studiat cu însuflețire alte ramuri ale matematicii, în timp ce eu toate acestea le-am studiat abia în calitate de student la prelegerile obișnuite; e drept, tot cu însuflețire latentă. Și dacă la Politehnica din Zürich Einstein și-a atras atenția profesorilor săi prin frecvența lui neregulată a cursurilor și printr-o anumită neparticipare, aceasta se explica prin faptul că el cunoștea deja aproape tot ce se predă și era ocupat cu probleme mai profunde.

Între anii 1900 și 1905 se pare că teoria cuantelor nu a înregistrat nici un progres. Serioasa și cuprinzătoarea carte a lui sir Edmund Whittaker *A History of the Theories of Aether and Electricity* (O istorie a teoriilor eterului și electricității), al cărei al doilea volum, recent apărut (Th. Nelson & Sons, Ltd. Edinburgh, 1953) tratează perioada de la 1900 pînă la 1926, nu vorbește nimic despre anii respectivi.

Dar, lucrurile s-au schimbat, cînd, în anul 1905, a apărut lucrarea lui Einstein [3]. Primele șase paragrafe conțin considerente teoretice care nu au stîrnit decît interesul cîtorva specialiști; în schimb, ultimele trei paragrafe tratează aplicații cu totul noi ale cuantelor, și anume, la regula lui Stokes cu privire la luminescență, la efectul fotoelectric și la ionizarea gazelor. Punctul de vedere general rezidă în aceea că în toate aceste cazuri este vorba de transformarea energiei cinetice E a unui electron într-o cantă de lumină $h\nu$ sau invers, astfel încît trebuie să fie valabilă o relație liniară de forma :

$$E = h\nu + \text{const},$$

care în diagrama (E, ν) apare ca o dreaptă pe pantă h , unde h este constanta universală a lui Planck, a cărei valoare a fost determinată de Planck din măsurători ale

radiației. Așadar, aici apar aserțiuni verificabile experimental și nu este de mirare că fizicienii experimentatori s-au aruncat asupra lor.

Nu este sarcina mea de a evoca mai îndeaproape istoria cercetărilor experimentale în această direcție. Este suficient să spun că lucrarea lui Einstein a stimulat o mulțime de experimente și a făcut pentru prima dată ordine în domeniul fenomenelor foarte variate, care sînt legate de generarea și anihilarea radiațiilor. Aș vrea însă să mă opresc acum asupra acelor prime șase paragrafe teoretice din lucrarea lui Einstein, în care se desfășoară de fapt profunzimea și forța de convingere a gândirii sale.

După cum subliniază Einstein neobosit, nu există un drum logic univoc de la faptele experienței la sistemele teoretice ale fizicii; acestea sînt copii ai fanteziei libere, ai speculației. Și totuși, nu încapе îndoială că valoarea unei teorii este cu atît mai mare, iar încrederea noastră în ea cu atît mai puternică cu cît este mai restrînsă libertatea de alegere, iar constrîngerea logică mai riguroasă. Mi se pare că realizările unite ale lui Max Planck și Albert Einstein se apropie de acest ideal. Permiteți-mi să încerc să explic această afirmație, folosind formulările și notațiile uzuale astăzi.

În lucrările preliminare, care au durat mulți ani, Planck a înțeles caracterul statistic al radiației corpului negru și a dezvoltat metodele pentru cercetarea teoretică a acesteia. El a ajuns la convingerea că entropia, datorită dependenței sale de probabilitatea unei stări, dependentă descoperită de Boltzmann, este mărimea hotărîtoare pentru un sistem termostatic. Despre densitatea radiației ρ se știa că ea trebuie să aibă forma $\rho = \nu^3 f(\nu/T)$, determinată de *legea deplasării a lui Wien* (din care rezultă *legea Stefan-Boltzmann* pentru radiația totală) și, în plus, că există două cazuri-limită: pentru temperaturile înalte este valabilă *legea lui Rayleigh* (proporționalitatea cu temperatura T), iar pentru temperaturile joase, *legea lui Wien* [proporționalitatea cu $\exp(-a/T)$].

Primul pas al lui Planck a fost de a înlocui cercetarea radiației prin studiul unui sistem de oscilatori armonici liniari de frecvență ν , care se află în echilibru statistic cu radiația. Un calcul pur electrodinamic dă pentru rapor-

tul dintre densitatea radiației ρ și energia medie u a unui oscilator valoarea $8 \pi \nu^2 / c^3$. Apoi Planck calculează a doua derivată a entropiei S în raport cu energia U ; pentru această mărime voi utiliza prescurtarea

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -k \gamma, \quad (1)$$

unde k este constanta gazelor pe particulă de gaz ideal; mai departe, în loc de temperatura T voi folosi mărimea $\beta = 1/kT$. Atunci un calcul termodinamic simplu (vezi anexa A) dă

$$\gamma = - \left(\frac{dU}{d\beta} \right)^{-1}, \quad (2)$$

Avantajul acestei notații rezidă în aceea că în ambele cazuri-limită sus-amintite, energia u raportată la un oscilator este o funcție deosebit de simplă în β , astfel încât expresia pentru (2) se poate determina îndată. Avem:

$$\begin{array}{ll} T \text{ mare (Rayleigh)} & \\ T \text{ mic (Wien)} & \end{array} \quad u = \begin{cases} \beta^{-1} & \frac{du}{d\beta} = \begin{cases} -u^2 \\ -\varepsilon_0 u \end{cases} \end{cases}, \quad (3)$$

Planck face apoi pasul îndrăzneț [1] de a interpola între aceste două cazuri, considerînd suma $-u^2 - \varepsilon_0 u$, care în cazurile-limită ale densității mari, respectiv mici, ale radiației trece în valori exacte. Apoi, prin integrare și ținînd seama de legea de deplasare a lui Wien pentru energia medie a unui oscilator (vezi anexa B), se obține:

$$u = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta \varepsilon_0} - 1}, \quad \varepsilon_0 = h\nu, \quad (4)$$

unde h este o constantă. Cu ajutorul factorului de transformare pe care l-am dat, aceasta duce la formula lui Planck pentru densitatea ρ a radiației.

Natural, toate acestea nu pot fi considerate ca o demonstrație, avînd în vedere caracterul arbitrar al mărimii γ^{-1} folosită la interpolare.

Într-o a doua lucrare [2], Planck interpretează energia oscilatorului (4) ca valoare medie a unei distribuții Boltzmann cu cuante de energie finite, $\epsilon_n = \epsilon_0 n = h\nu n$, ($n = 0, 1, 2, \dots$),

$$u = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n e^{-\beta \epsilon_n}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta \epsilon_n}} = - \frac{d}{d\beta} \ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta \epsilon_0 n} = \frac{\epsilon_0}{e^{\beta \epsilon_0} - 1}$$

Numai acela care a fost crescut ca mine, în tradiția clasică, poate să aprecieze pe deplin îndrăzneala acestei idei. Personal, Planck era înclinat să considere descompunerea energiei în cuante finite nu ca proprietate a radiației însăși, ci ca rezultat al interacțiunii sale cu oscilatorii. Aici a intervenit Einstein [3]. El a descoperit o semnificație fizică simplă a mărimii γ^{-1} , folosită de Planck pentru interpolare, care conduce în mod direct la ideea unor cuante de lumină independente, și în plus justifică însăși metoda interpolării. Einstein își întemeiază considerațiile pe relația lui Boltzmann dintre entropia S și probabilitatea P ,

$$S = k \ln P. \quad (5)$$

Deoarece pe atunci aceasta nu era încă recunoscută în mod unanim, el dă la început o demonstrație simplă (care mie mi se pare și astăzi a fi cea mai bună). Considerentele următoare sînt legate în modul cel mai strîns de teoria sa a fluctuațiilor și a mișcării browniene.

Ideea principală constă în inversarea formulei (5), considerarea probabilității ca funcție de entropie,

$$P = e^{S/k} \quad (6)$$

și folosirea în mod convenabil a proprietăților termodinamice ale lui S .

Gîndiți-vă că un sistem care se află în echilibru termodinamic ar fi împărțit în porțiuni mici, egale între ele : atunci, datorită naturii statistice a căldurii, energia E nu va fi în nici o parte egală cu energia $\bar{E} = U$, ce revine fiecărei părți în medie, ci vor apare fluctuațiile $\Delta E = E - \bar{E}$. Entropia porțiunii considerate poate fi luată (dacă volumul este constant) ca funcție de E și dezvoltată după puterile ΔE ; atunci, entropia totală nu va avea nici un termen liniar, deoarece pentru un sistem izolat adiabatic suma pentru toate părțile este $\sum \Delta E = 0$. Folosind notația (1), avem :

$$\sum S = \text{const} - \frac{1}{2} k \gamma \sum (\Delta E)^2 + \dots$$

Acum, din (6), prin aproximare rezultă

$$P = e^{\sum S/k} = P_0 e^{-\frac{1}{2} \gamma \sum (\Delta E)^2} ; \quad (7)$$

de unde, conform cu (2), se obține îndată (vezi anexa C) că :

$$\overline{(\Delta E)^2} = \frac{1}{\gamma} = - \frac{dU}{d\beta} . \quad (8)$$

Aceasta este formula fundamentală pentru fluctuațiile energiei, așa cum este folosită în teoria lui Einstein a mișcării browniene. Dacă se consideră, de exemplu, un sistem material cu volum constant, atunci se obține cunoscuta lege a lui Einstein

$$\overline{(\Delta E)^2} = k T^2 c_v ,$$

unde $c_v = dU/dT$ este căldura specifică.

În cazul emisiunii, E este energia totală a radiației de frecvență ν , cuprinsă într-un volum mic, adoptat ca unitate, deci în medie egal cu ρ ; este comod ca în locul ei să constatăm mărimea $u = \rho c^3 / 8\pi \nu^2$, fără a ține seama de

faptul că u a fost definit ca energia medie a unui oscilator care se află în echilibru cu radiația. De altfel, mai târziu s-a stabilit că u are o anumită semnificație pentru radiația însăși; anume, câmpul radiației se poate descompune după Fourier, și atunci fiecărei componente a dezvoltării îi corespunde un oscilator și se constată că $8\pi\nu^2/c^3$ este numărul oscilatorilor radiației în unitatea de volum pentru intervalul de frecvență 1, iar u este energia unui oscilator.

Einstein consideră cazul temperaturilor joase (Wien), unde în unitatea de măsură u energia radiației se exprimă prin

$$u = u_0 e^{-\epsilon_0/\beta};$$

în acest caz, din (8) rezultă

$$\overline{(\Delta E)^2} = \epsilon_0 u, \quad (T \text{ mic}). \quad (9)$$

Dacă E se consideră ca n — multiplu al „cuantei de energie“ mici ϵ_0 adică

$$E = n \epsilon_0 \quad (10)$$

atunci rezultă $u = \epsilon_0 \bar{n}$, unde $\bar{n}$ este numărul mediu al cuantelor, iar pentru abaterea medie pătratică a lui n avem:

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n}, \quad (T \text{ mic}). \quad (11)$$

Dar, în virtutea cunoscutelor legi statistice, această formulă afirmă că energia radiației se comportă astfel ca și cum ar consta din particule independente (de mărime $\epsilon_0 = h\nu$).

Acesta este conținutul esențial al părții teoretice a lucrării lui Einstein. Permiteți-mi însă să mai continui puțin cu privire la această chestiune.

Același raționament ca mai sus conduce, în cazul-limită (Rayleigh) al temperaturilor înalte, unde $u = \beta^{-1}$, la formula

$$\overline{(\Delta E)^2} = u^2, \quad (T \text{ mare}) \quad (12)$$

sau la

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n}^2 \quad (T \text{ mare}). \quad (13)$$

Acum, interpolarea lui Planck prin adunarea valorilor valabile în cele două cazuri-limită se justifică prin observația simplă că abaterile medii pătratice sînt aditive, dacă sînt provocate de influențe independente.

Dar ce sînt aceste două procese? Unul a fost interpretat de către Einstein: pentru temperaturile joase, adică pentru densitățile mici ale radiației, emisiunea se comportă ca un gaz ideal. Dar în ce constă al doilea proces care se manifestă în stare pură la temperaturi înalte? H. A. Lorentz a arătat că un amestec statistic de unde plane cu amplitudini și faze arbitrare duce exact la expresia (13) pentru fluctuația energiei.

Se vede așadar că dualitatea undă-particulă este deja conținută integral, în mod implicit, în lucrarea lui Einstein. Pentru densitățile mici ale energiei apare fenomenul corpuscular, iar numărul particulelor oscilează conform cu (11); pentru densitățile mari însă este valabilă (13), iar pentru densitățile medii avem

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} + \bar{n}^2 = \bar{n} (\bar{n} + 1). \quad (14)$$

Încă aici apare așadar acea particularitate a efectelor cuantice care constă în faptul că din formule clasice se obțin formule cuantice exacte, dacă se înlocuiește n^2 prin $n(n + 1)$.

Dar cum au fost primite aceste idei? Permiteți-mi să vă vorbesc despre experiența mea proprie. La Göttingen, după cîte îmi amintesc, nu cred să fi auzit ceva despre cuante; nici la Cambridge, unde în primăvara și vara anului 1906 am audiat timp de cîteva luni prelegerile lui J. J. Thomson și Larmor și am participat la un curs experimental de la Laboratoarele Cavendish. Abia în toamna anului 1906, cînd am venit la Breslau, la Lummer și Pringsheim, am intrat într-o adevărată atmosferă cuantică. Căci ei contribuiseră amîndoi, în mod esențial, la cercetarea experimentală a radiației corpului negru. Dar, cu

toate că formula lui Planck se afla în centrul discuțiilor, oamenii erau totuși dispuși să considere propunerea lui Planck cu privire la cuantificarea energiei oscilatorilor doar ca o ipoteză de lucru provizorie. Iar cuantele de lumină ale lui Einstein nu erau luate în serios. Doar Lummer era și el un mare specialist în domeniul opticii ondulatorii — amintiți-vă de placa Lummer — și nu se putea pretinde pe atunci ca cineva care observa zilnic interferențe să creadă într-o reînnoire a teoriei corpusculare. Se făceau încercări de a înțelege în mod clasic legea $E = h \nu$. Și eu m-am făcut vinovat de un asemenea delict, și vreau să vi-l prezint pentru a vă amuza. Gândiți-vă la un măr la care lungimea l a peduncului descrește invers proporțional cu pătratul înălțimii H față de sol ; atunci

$$\nu \sim 1/l \sim H.$$

Dacă acum copacul este scuturat cu o anumită frecvență, atunci merele care se află la o anumită înălțime intră în rezonanță, cad jos și ajung la pământ cu o energie cinetică proporțională cu înălțimea de la care au căzut și, prin urmare, cu frecvența scuturării : *Voilà !* Astăzi, acestea ni se par cam puerile, ca să nu spunem prostesti. Dar pentru a mă scuza, pot să vă spun că însuși Max Planck a amintit într-o cuvîntare de acest model ; cum de i-a devenit cunoscut nu știu.

La începutul anului 1907 a apărut a doua contribuție fundamentală a lui Einstein la teoria cuantelor, și anume teoria sa asupra căldurii specifice [4]. Ea arată în mod clar că nu e vorba, după cum credea Planck, despre ceva care privește schimbul de energie între particule și radiație, ci despre un principiu nou, cu totul general, care cuprinde electrodinamica și mecanica. Cum s-a format treptat în mintea mea această înțelegere a lucrurilor nu pot să-mi amintesc amănunțit. Între timp, îl cunoscusem pe Einstein, și din convorbirile cu dînsul am învățat mai mult decît din scrierile sale. Adeziunea mea la punctul de vedere al lui Einstein s-a exteriorizat prin lucrarea întocmită împreună cu prietenul meu Theodor von Kármán despre căldura specifică a rețelelor cristaline, în care am precizat

considerentele lui Einstein ținând seama de spectrul oscilatorilor, chestiune în care, de altfel, Debye ne-a luat-o înainte cu câteva săptămîni. Dar aceasta a avut loc abia în anul 1912. În anii următori, s-a copt proiectul Academiei din Berlin de a-l chema la Berlin pe Einstein, care pe atunci era profesor la Școala superioară tehnică confederală de la Zürich. Pentru a sprijini acest proiect, patru din cei mai importanți fizicieni germani, Planck, Nernst, Rubens și Warburg au întocmit un raport pentru Ministerul Învățămîntului din Prusia, în care au enumerat și apreciat contribuțiile lui Einstein. Se află în acest raport un pasaj uimitor, pe care vi-l pot comunica fără a comite vreo indiscreție, deoarece el este deacum tipărit în frumoasa carte a lui Carl Seelig *Albert Einstein și Elveția*. Se arată acolo printre altele: „În rezumat, se poate spune că printre marile probleme prin care fizica modernă este atît de bogată nu există vreuna față de care Einstein să nu fi adoptat o poziție remarcabilă. Faptul că în speculațiile sale el sare cîteodată peste cal, ca de exemplu în ipoteza sa cu privire la cuantele de lumină, nu trebuie să i se reproșeze prea aspru. Căci nici în cele mai exacte științe ale naturii nu se poate introduce o adevărată înnoire, fără a risca uneori“.

Aceasta vă arată cît de general era pe atunci scepticismul în ce privește ideea cuantelor de lumină. Nu intră în sarcina mea să relatez pe larg cum s-au schimbat treptat stările de spirit. Vreau numai să subliniez cîteva evenimente importante. În primul rînd, observația lui J. J. Thomson din 1907 că numărul atomilor ionizați de radiațiile Roentgen scade pe măsura îndepărtării de sursa de radiație, în timp ce pentru fiecare act de ionizare trebuie să fie furnizată una și aceeași energie; de unde, el a conchis că nu e posibil ca radiația să fie formată din unde sferice uniforme, ci se comportă mai degrabă ca o ploaie de particule. Mai tîrziu (1916), Einstein a fundamentat statistic această idee a radiației de ace (*Nadelstrahlung*) [5], calculînd impulsul pe care îl primește sau îl cedează particula aflată într-un cîmp de radiații în cazul absorbției și emisiei; cererea ca mișcarea browniană normală să nu fie stînjenită în acest fel poate fi satisfăcută numai dacă

emisia se comportă ca un gaz de particule, avînd energia $h \nu$ și impulsul $h\nu/c$.

Între timp, începînd din 1913, au apărut lucrările lui Bohr cu privire la teoria cuantică a orbitelor electronice în atomi și la originea spectrelor. De atunci, a devenit clar că fizica viitorului va fi dominată de ideea cuantelor. Din cauza discuției despre condițiile cuantice și regulile cuantice de alegere, necesare pentru descrierea mișcării electronilor, structura cuantică a luminii a fost aproape uitată, pînă ce în anul 1922 ea a devenit din nou actuală în urma descoperirii efectului Compton și a explicării sale ca ciocnire a fotonilor și electronilor. Această interpretare se bazează pe aplicarea legilor de conservare a energiei și impulsului, folosindu-se în egală măsură ambele descoperiri ale lui Einstein, pe care le serbăm în aceste zile : formulele relativiste

$$E = mc^2, p = mc, m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

pentru electroni și formulele cuantice,

$$E = h \nu, p = h\nu/c$$

pentru fotoni.

În aceeași ordine de idei se integrează lucrarea lui Smekal, care în anul următor, 1923, a atras atenția asupra faptului că conform legii conservării energiei, în cazul unui sistem format dintr-un atom (sau o moleculă) și un foton, trebuie să ne așteptăm la apariția unui nou tip de difuzie a luminii, și anume a unei difuzii cu schimbarea lungimii de undă. Aceasta a dat un impuls pentru revizuirea de către Ladenburg, Kramers și Heisenberg a teoriei dispersiei din punctul de vedere al conceptelor cuantice, ceea ce a constituit un pas important în dezvoltarea înceată, care pînă la urmă a condus la mecanica cuantică. Fenomenul prezis de Smekal a fost descoperit abia în anul 1928 de către Raman la molecule și de către Landsberg și Mandelstam la cristale ; în prezent, acest fenomen se numește efectul Raman.

În ceea ce privește formula radiației, Einstein însuși a dedus-o în 1916 pe baza postulatelor lui Bohr asupra stărilor staționare [6], considerînd emisia și absorbția cuantelor de lumină prin analogie cu dezintegrarea radioactivă. Simetria probabilităților A_{nm} de tranziție între două stări n și m , $A_{nm} = A_{mn}$, care apare aici, era de asemenea un jalon important pe drumul spre mecanica cuantică. Această deducere a formulei radiației din probabilitățile de tranziție corespunde în teoria gazelor cu utilizarea formulei ciocnirilor a lui Boltzmann. Dar legile de echilibru ale gazului se pot deduce, de asemenea, fără a lua în considerație procesele de ciocnire, prin stabilirea stării celei mai probabile. Oare nu poate fi găsită și formula radiației ca ecuație energetică a stării gazului fotonic? Considerațiile inițiale ale lui Einstein, referitoare la fluctuații, se află în această direcție, însă ele conduc la formula (11), caracteristică pentru un gaz numai în cazul densităților mici ale radiației, în timp ce în general e valabilă formula mai complicată (14). Această problemă l-a preocupat și l-a neliniștit pe Einstein timp îndelungat, și cînd, în anul 1924 indianul Bose a găsit soluția, introducînd în calculul statistic indiscernabilitatea principială a fotonilor, Einstein a preluat îndată această idee și a extins-o la particulele materiale [7]. El știa încă de atunci de ideile îndrăznețe ale lui De Broglie cu privire la mecanica ondulatorie (publicate în comunicări scurte, începînd din 1923 și adunate în renumita sa disertație din 1924). Statistica lui Einstein și Bose este ultima contribuție pozitivă a lui Einstein la teoria cuantelor. Aici pot să întrerup rezumatul meu istoric. De aici încolo atitudinea lui Einstein față de dezvoltarea mai departe a fundamentelor teoriei cuantelor, pe care le-a creat el însuși, devine tot mai critică și mai sceptică.

Paradoxala dualitate undă-corpusul a stabilit-o el însuși. Problema principală a fizicii teoretice era de a ridica această contradicție aparentă. Ea a fost abordată din ambele părți: din generalizarea reprezentărilor lui Bohr asupra orbitelor electronice a izvorît mecanica matriceală, care a fost întemeiată de către Heisenberg și elaborată de dînsul, împreună cu Jordan și cu mine, iar independent dezvoltată și de Dirac; iar din ipoteza lui De Broglie a

izvorît mecanica ondulatorie a lui Schrödinger. În curînd, s-a constatat că ambele metode nu erau decît prezentări diferite ale aceleiaşi teorii.

Formalismul teoriei era bine elaborat şi justificat încă înainte de a se reuşi să se găsească o interpretare rezonabilă. Aceasta diferă de teoria clasică prin renunţarea la antecalcularea exactă a situaţiilor fizice; ea permite numai determinarea probabilităţilor. Marea majoritate a fizicienilor au acceptat această concepţie statistică, în special experimentatorii, deoarece ea corespunde pe deplin situaţiei empirice în cercetările atomice.

Dar Einstein a considerat că interpretarea statistică este nesatisfăcătoare şi a încercat mereu s-o dezminţă. Şi totuşi, interpretarea pătratului funcţiei de undă ca probabilitate porneşte chiar de la Einstein. El a exprimat ideea că densitatea medie a fotonilor trebuie să coincidă într-o radiaţie luminoasă cu densitatea energiei undelor electromagnetice care descriu această radiaţie. Este aceeaşi idee pe care am propus-o eu în 1927 pentru interpretarea funcţiei de undă a lui Schrödinger şi care astăzi, generalizată în mod convenabil, este acceptată unanim. Contradicţia aparentă, care constă în folosirea simultană a reprezentării ondulatorii şi a celei corpusculare, a fost lămurită prin relaţiile de imprecizie ale lui Heisenberg. În sfîrşit, conceptul de complementaritate al lui Niels Bohr a dat întregului edificiu al mecanicii cuantice un fundament epistemologic.

Fotonul însuşi este desigur o particulă aparte, care nu are masă şi se mişcă în permanenţă cu viteză constantă. De fapt, el ţine nu de mecanica cuantică propriu-zisă, ci de electrodinamica cuantică. Încă în primele lucrările ale lui Heisenberg, Jordan şi ale mele se găseşte cuantificarea cîmpului electromagnetic prin stabilirea relaţiilor de permutare între componentele cîmpului, şi ca aplicaţie cea mai importantă se deduce formula fluctuaţiei (14) pentru radiaţia corpului negru prin interferenţa undelor cuantificate, unde ambii termeni $n + n^2$ apar în mod automat. Acesta este începutul modest, din care provine rafinată electrodinamica cuantică de astăzi a lui Tomojeda, Schwinger, Feynman şi alţii.

Dar nici filozofia lui Bohr, nici numeroasele succese ale mecanicii cuantice clasice sau exactitatea uimitoare a

rezultatelor obținute cu ajutorul electrodinamicii cuantice nu l-au convins pe Einstein să recunoască aceste teorii. El nu neagă utilitatea lor, dar le privește ca mijloace auxiliare imperfecte, provizorii, care o dată vor trebui înlocuite cu ceva mai bun.

Poziția lui Einstein se întemeiază pe convingerile sale filozofice. Dau două citate din scrisorile sale către mine, pe care, de altfel, cu aprobarea sa, le-am publicat și în cartea *Natural Philosophy of Cause and Chance*, (Clarendon Press, Oxford, 1949). Astfel, în scrisoarea din 7 noiembrie 1914 el scrie :

„În ce privește opiniile noastre științifice, am evoluat spre antipozii. Tu crezi într-un Dumnezeu care aruncă zaruri, iar eu într-o deplină legitate a unei lumi existente în mod obiectiv, legitate pe care vreau s-o prind într-un mod pur speculativ. Sper că cineva va găsi o cale mai realistă, respectiv un substrat mai palpabil pentru o asemenea concepție decât am reușit eu. Marele succes inițial al teoriei cuantice nu mă poate totuși sili să cred că la bază stă jocul cu zaruri“.

Iar la 3 decembrie 1947 :

„Poziția mea în fizică nu pot să ți-o justific astfel încât tu s-o găsești cât de cât rezonabilă. Eu recunosc firește că modul principal statistic de tratare, de a cărui necesitate, în cadrul formalismului existent, tu ai fost primul care și-a dat seama, conține o mare doză de adevăr. Dar nu pot să cred în mod serios în el, deoarece această teorie este incompatibilă cu principiul că fizica trebuie să reprezinte o realitate în spațiu și timp fără forțe fantomatice care acționează la distanță... Este convingerea mea fermă că pînă la urmă vom ajunge la o teorie ale cărei obiecte legate în mod legic nu vor fi probabilități, ci reflec-tarea unor stări de fapt, așa cum pînă de curînd se considera ca de la sine înțeles. Dar, pentru a justifica această convingere, nu pot să aduc argumente logice, ci numai mărturia degetului meu mic, deci nu o autoritate care să poată inspira vreun respect în afara persoanei mele“.

Acum un an și ceva am avut din nou un schimb de scrisori cu Einstein în legătură cu un mic articol în care, pe baza unui exemplu, el dezvoltă aceeași idee : negarea probabilității ca obiect autentic al fizicii teoretice. Analiz-

zînd acest model, m-a cuprins îndoiala dacă într-adevăr mecanica clasică este în stare să enunțe aserțiuni deterministe. Între timp, m-am convins că determinismul mecanic se bazează pe o ipoteză care contrazice întregul fel de a gîndi al fizicii moderne, care pornește chiar de la Einstein și anume contrazice postulatul conform căruia afirmațiile care principial nu pot fi verificate experimental nu au sens. De curînd, am publicat o scurtă comunicare în legătură cu aceasta în „Physikalischen Blättern“¹. Nici mecanica clasică nu poate să emită decît enunțuri de probabilități.

De aceea, această obiecție a lui Einstein împotriva concepției statistice a mecanicii cuantice îmi pare lipsită de obiect. Dar, din citatele de mai sus și din schimbul de scrisori de mai tîrziu, pe care le-am amintit, rezultă că ceea ce determină respingerea de către Einstein a fizicii cuantice de astăzi nu este atît problema determinismului, cît credința sa în realitatea obiectivă, independent de observator, a fenomenului fizic. Aceasta este o problemă cu mult mai adîncă, pe care nu pot s-o abordez aici. Am arătat în altă parte² că obiecțiile lui Einstein pot fi preîntîmpinate dacă se analizează sensul afirmațiilor cu privire la realitatea obiectelor fizice și se utilizează în mod corespunzător conceptul matematic de invariant al unei transformări.

Einstein nu s-a mulțumit să critice interpretarea statistică a mecanicii cuantice, ci a încercat neconținut să creeze un alt fundament pentru fizică. Punctul său de pornire a fost tocmai teoria relativității generale, pe care a căutat să o generalizeze, în speranța de a ajunge pînă la urmă la o explicare a fenomenelor cuantice și a particulelor elementare. El nu a obținut rezultate pozitive, iar fizicienii au dat puțină atenție lucrărilor sale ample și dificile.

Astfel, Einstein a ajuns la o izolare, care ar fi fost tragică, dacă temperamentul său plin de viață și optimism

¹ A se vedea studiul *Este oare mecanica clasică într-adevăr deterministă*?, p. 204 din această carte.

² A se vedea studiul *Realitatea fizică*, de la p. 186 din această carte.

nu l-ar fi apărat de amărăciune. El a fost doar din totdeauna un solitar. El căuta adevărul pentru propria sa satisfacție, nu pentru vreun avantaj material sau pentru glorie. Tragedia vieții sale este tragedia științei noastre în ansamblu, tragedia utilizării abuzive a rezultatelor cunoașterii în lupta popoarelor pentru puterea politică. Ce crede el despre aceasta, o poate lămuri o scurtă scrisoare către editorul ziarului american „The Reporter”.

„Mă întrebați ce cred despre articolele dumneavoastră cu privire la situația cercetătorilor științifici din America. În loc de a încerca să analizez problema, vreau să-mi exprim sentimentele printr-o observație scurtă: dacă aș fi din nou tânăr și aș avea de ales o profesiune de viață, atunci n-aș încerca să devin un om de știință, un savant sau un profesor. Aș prefera să fiu lăcătuș sau negustor ambulant, în speranța de a obține astfel acea mică cantitate de independență care mai poate fi atinsă în condițiile de astăzi”.

Este aceeași idee pe care mi-a exprimat-o încă într-o vreme relativ liniștită, acum peste 40 de ani, ca sfat acordat unui tânăr fizician. Nu poate să existe o formă mai modestă și totodată mai aspră de condamnare a activității științifice de astăzi, care nu mai slujește spiritul, cu puterile acestei lumi. Dar aceasta nu ține de tema noastră.

O prezentare a lui Einstein ca cercetător și gânditor ar fi totuși incompletă dacă n-am arunca o rază de lumină cît de cît și asupra lui Einstein-omul. Permiteți-mi să închei cu cîteva fraze dintr-o scrisoare a sa adresată mie:

„Sentimentul pentru ceea ce trebuie să fie și pentru ceea ce nu trebuie să fie crește și moare ca un copac, și nici un fel de îngrășământ nu poate să aibă aici un rol prea mare. Fiecare în parte nu poate decît să dea exemplu de puritate și să aibă curajul de a susține cu seriozitate în mijlocul cinicilor convingeri etice. De mult mă străduiesc, cu succes schimbător, să acționez astfel”.

Sînt vorbele de resemnare ale unuia care și în cele omenеști crede în determinare, dar ținînd seama și de acțiunea personalității etice. Este o metodă remarcabilă de a salva libertatea morală, care, filozofic, poate că este foarte contestabilă. Dar și filozofia fizicii a lui Einstein ni se pare contestabilă. Aceasta nu a întrerupt prietenia noas-

tră, căci nu de doctrine depinde aceasta, ci de puritatea și cinstea în gândire și sentimente, și în amîndouă îl stimăm ca model și dascăl.

ANEXĂ

A. Pentru fiecare sistem termodinamic cu volum constant are loc

$$dS = \frac{dU}{T} = k\beta dU; \quad (1)$$

de aceea

$$-k\gamma = \frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{d}{dU}(k\beta) = k \frac{d\beta}{dU}, \quad \gamma = - \left(\frac{dU}{d\beta} \right)^{-1}. \quad (2)$$

B. Dacă acum punem, împreună cu Planck,

$$\frac{du}{d\beta} = -u^2 - \epsilon_0 u, \quad (3)$$

atunci, prin integrare elementară cu condiția de limită că pentru $\beta = 0$, rezultă legea lui Rayleigh, $u = \beta^{-1}$, adică

$$u = \frac{\epsilon_0}{e^{\beta\epsilon_0} - 1}. \quad (4)$$

Din legea de deplasare a lui Wien $\rho = \nu^3 f(\nu/T)$ rezultă pentru $u = \rho c^3 / 8\pi \nu^2$ (vezi pag. 279).

$$u = \nu F(\nu \beta); \quad (5)$$

deci trebuie să avem

$$\epsilon_0 = h\nu \quad (6)$$

C. (7) este o distribuție Gauss în variabila $\Delta E = x$. Dacă probabilitatea totală se normalizează la 1,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P dx = P_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2} \gamma x^2} dx = P_0 \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} = 1, \quad (7)$$

atunci trebuie să avem $P_0 = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}}$, astfel încît

$$P(x) = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \gamma x^2}. \quad (8)$$

De aici se obțin valorile medii

$$\overline{\Delta E} = \bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x P(x) dx = 0,$$

$$\overline{(\Delta E)^2} = \overline{x^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 P(x) dx = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{-\frac{1}{2} \gamma x^2} dx = \frac{1}{\gamma}. \quad (9)$$

Bibliografie

- [1] M. Planck, în „Verh. dtsh. phys. Ges.“, **2** (1900), p. 202.
- [2] Idem, în *loc. cit.*, p. 237.
- [3] A. Einstein, în „Ann. Phys.“, **17** (1905), p. 132; **20** (1906); p. 199; „Phys. Z.“, **10** (1909), pp. 185, 817.
- [4] Idem, în *loc. cit.*, **22** (1907), p. 180.
- [5] Idem, în „Mitt. phys. Ges. Zürich“, 1916, Nr. **18**; „Phys. Z.“, **18** (1917) p. 121.
- [6] Idem, în „Ber. dtsh. phys. Ges.“, **18** (1916), p. 318.
- [7] Idem, în „Sitzgsber. preuss. Akad.“, Berlin, 1924, p. 261; 1925, pp. 3, 18.

*Amintiri despre Einstein**

Am primit cu plăcere invitația dumneavoastră amicală de a vorbi despre Einstein, căci pentru mine este o bucurie să evoc întâlnirea cu el și să povestesc despre acest mare eveniment din viața mea.

L-am cunoscut pe Einstein la Congresul cercetătorilor naturii de la Salzburg din 1909, patru ani după apariția celor trei mari lucrări ale sale (publicate în volumul XVII al publicației „Annalen der Physik“, 1905), care l-au așezat dintr-o dată în rîndul fizicienilor de frunte. Dintre aceste lucrări cea mai cunoscută se ocupă cu teoria relativității, în timp ce celelalte două se referă la mișcarea browniană și la ideea cuantelor de lumină. La început, relațiile noastre au fost slabe; ele se limitau la scrisori ocazionale cu privire la probleme științifice. Acestea se refereau la teoria relativității restrînsă — despre care voi spune mai încolo cîte ceva — iar apoi și la teoria cuantelor. Importanța lucrării sale din 1905 asupra cuantelor de lumină am înțeles-o abia cu mult mai tîrziu. Abia teoria lui Einstein asupra căldurii specifice din 1907 mi-a deschis ochii. Ca majoritatea fizicienilor de pe atunci, crezusem și eu că ideea lui Planck cu cuantele ar fi o ipoteză de lucru care aduce servicii utile, dar care în curînd va fi eliminată sau redusă la conceptele obișnuite din fizica teoretică. Cînd însă am încercat, împreună cu prietenul meu, Theodor von Kármán, să precizăm formula

* Referat ținut la adunarea generală anuală a Societății germane pentru sprijinirea învățămîntului matematicii și științelor naturii de la Hanovra, din 4 aprilie 1956, publicat în „Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht“, IX (1956), p. 97.

simplă a lui Einstein pentru energia unui cristal, luînd în considerare legăturile atomului, ne-a devenit clar că purtătorul oscilațiilor monocromatice în molecule și cristale nu este atomul substanțial, ci coordonatele normale abstracte ale întregului sistem. Privind retrospectiv, se vede că aceasta a fost un indiciu indubitabil împotriva valabilității mecanicii clasice a lui Newton. Dar, pe cîte îmi amintesc, noi n-am simțit vreo mare zguduire intelectuală, ci numai bucuria de a fi găsit ceva nou, bucurie care de altfel a fost puțin atenuată de faptul că Peter Debye publica aceleași rezultate în același timp. Abia discuția în scris cu Einstein mi-a arătat importanța chestiunii; din păcate, din acest schimb de scrisori n-a mai rămas nimic. Din punct de vedere personal, preocupările pentru oscilațiile în rețelele cristaline au fost pentru mine de mare importanță practică; ele mi-au deschis un domeniu de activitate propriu, nou, teoria cinetică a solidelor rigide, care deși nu pătrundea în profunzimea principiilor fundamentale, furniza mult material, nici pînă astăzi epuizat, pentru cercetări particulare. Atît prima cît și ultima mea carte (1915, respectiv 1955) sînt expuneri din acest domeniu.

În relații personale strînse cu Einstein am intrat în anul 1915, cînd am fost chemat la Berlin ca profesor agregat, pentru a-l ajuta pe Max Planck. Einstein era în Berlin din 1913, ca succesor al lui Van't Hoff la Academia Prusiei. L-am vizitat foarte curînd. Dar era război, trebuia să devin soldat și am dispărut, așa că n-am ajuns la relații mai intime decît aproximativ cu un an mai tîrziu, cînd am fost mutat la Comisia de încercări a artileriei, pe scurt A.P.K. Clădirea unde aveam serviciul era în Spichernstrasse, foarte aproape de locuința lui Einstein, și acum ne vedeam des, uneori aproape zilnic. După ce am prins rădăcini în administrația militară, am găsit timp să-mi reiau lucrările științifice. În birou aveam două sertare, unul plin cu hîrtii cu privire la sonometrie, la care lucram împreună cu o duzină de alți fizicieni în uniformă, celălalt cu propriile mele cercetări: la început corecturi ale primei mele cărți *Dynamik der Kristallgitter* (Dinamica rețelelor cristaline), apoi încercări noi cu privire la chestiuni de optică și de fizică a cristalelor. În aceeași cameră, la alte mese, se aflau Erwin Madelung, mai tîrziu suc-

cesorul meu la Frankfurt, și Alfred Landé, în prezent profesor la Columbus (Ohio). Și aceștia și-au aranjat câte două sertare ; eram absolut siguri că maiorul nostru nu va observa deosebirea dintre formulele acustice ale sonometriei și celelalte hieroglife ale noastre. Acolo s-a calculat pentru prima oară constanta lui Madelung, pe care Landé și cu mine am folosit-o în problema energiei rețelelor de ioni și la aplicarea acestor rezultate pentru determinarea constantelor fizice și a căldurii reacțiilor chimice. Einstein a luat lucrarea noastră pentru a o publica la Academia din Berlin. Când peste câteva zile am intrat în camera de lucru de la A.P.K., l-am găsit pe Landé desperat : în formula pentru energie am uitat să ținem seama de faimosul factor $1/2$, ceea ce era o eroare grosolană asupra căreia, la seminariile teoretice, se atrăgea atenția fiecărui începător. Rezultatul nostru părea lipsit de orice speranță. Nu mi-a rămas decât să alerg în pauza de prînz la Einstein și să-l rog să retragă lucrarea. Atunci am auzit pentru prima oară rîsul său minunat ; m-a rușinat oarecum, dar nu m-a distrus. Căci el a spus : „Rezultatul vostru este poate numeric fals, dar în fond totul e în ordine, mai gândiți-vă puțin și vă veți da seama ce înseamnă factorul $1/2$, pe care l-ați uitat“. Și așa s-a întîmplat. Tocmai eroarea matematică ne-a condus la o fizică corectă, și lucrarea a fost salvată. Era vorba din nou despre o lipsă de funcționare a unui model de mecanică clasică (el furnizează doar jumătatea valorii observate a energiei reticulare), și acesta a fost un nou jalon pe drumul spre desăvîrșirea teoriei cuantelor. A nu mă descuraja atunci cînd o idee rezonabilă nu concordă dintr-o dată cu realitatea, această învățătură primită de la Einstein m-a ajutat mereu.

Dar dumneavoastră doriți să vă vorbesc nu despre micile mele lucrări, ci despre marile idei ale lui Einstein. Acestea se învălneau pe atunci în jurul teoriei relativității generale și, deși eram de cîțiva ani familiarizat cu aceasta, sensul ei mi-a apărut totuși de-abia din discuțiile cu Einstein.

În teoria relativității restrînsă eram la mine acasă încă de pe vremea studenției. Doar ea nu fusese creată de Einstein singur din nimic, așa cum se afirmă adesea în

broșurile de popularizare. Problema relativității s-a cristalizat încetul cu încetul din faptele observate și și-a găsit o soluție matematică formală datorită lui Fitz Gerald, Larmor, Poincaré și Lorentz. În același an 1905, în care a apărut prima lucrare de relativitate a lui Einstein, am participat la Göttingen la un seminar condus de Hilbert și Minkowski, în care întregul complex de probleme a fost temeinic prelucrat; contribuția lui Minkowski a fost o schiță a ideilor pe care el le-a făcut cunoscute prin amplul său articol din „Göttinger Nachrichten“, în anul 1907, și în forma populară, prin conferința sa *Raum und Zeit* (Spațiu și timp), la Congresul cercetătorilor științifici de la Köln din 1908. Între timp, am revenit de la Göttingen în orașul meu natal Breslau și am lucrat la o problemă relativistă, referitoare la ecuațiile de mișcare ale electronului, despre care am discutat cu prietenii mei. Unul dintre aceștia, polonezul Stanislas Loria, care mai târziu a devenit primul profesor polonez la Wrocław, mi-a atras atenția asupra lucrărilor lui Einstein. Ideea de relativitate mi-era cu totul familiară. Am folosit metoda descoperită de Minkowski, în cadrul căreia spațiul și timpul se unifică într-o „lume“ de evenimente, care este o varietate cvasi-euclidiană, cvadridimensională și care s-a impus în curând ca fiind foarte potrivită pentru această problemă. Și totuși, ca și pentru mulți alții, lucrările lui Einstein au fost și pentru mine o revelație. Căci abia datorită lor mi s-a dezvăluit adevăratul sens adânc al transformărilor Lorentz și s-a introdus în fizică un punct de vedere filozofic nou. Această filozofie susține că enunțurile care sînt principial inabordabile experimentării sînt suspecte și pe cît posibil trebuie să fie înlăturate din fizică. În cazul relativității, este vorba de asemenea enunțuri ca: un corp are o anumită poziție și viteză în spațiu sau două evenimente din locuri diferite sînt simultane. Despre poziția absolută și despre viteza absolută s-a discutat mult de la Newton încoace. Propriu-zis nou în ideile lui Einstein a fost extinderea criticii relativiste la timp. Faptul că viteza luminii este finită are ca rezultat că enunțul după care două evenimente din locuri diferite sînt simultane nu are un conținut empiric verificabil. Astăzi, acest lucru îl învață orice student din prelegeri elementare și nu-i vine

greu să înțeleagă definiția lui Einstein cu privire la simultaneitatea relativă. Ba sînt încredințat că și elevii din cursul superior o înțeleg și se pot bucura de ea. Dar pe atunci, acum 50 de ani, era ceva nou și întâmpina rezistență nu numai din partea unor profani dar și din partea unor fizicieni și filozofi, care nu se puteau elibera de reprezentările tradiționale. Lorentz însuși nu s-a putut împăca pe deplin pînă la sfîrșitul vieții sale cu faptul că nu există nici un eter în repaus ca purtător al cîmpurilor și undelor electromagnetice. Și totuși, el a fost acela care a găsit bazele matematice ale teoriei: transformările, care-i poartă numele. Ceea ce-l deosebește pe Einstein de Lorentz și Poincaré este faptul că aceștia au dezvoltat teoria din ecuațiile lui Maxwell ale cîmpului electromagnetic, în timp ce Einstein a arătat că ele se pot întemeia pe principii epistemologice cu mult mai generale. Și faptul este important, pentru că Einstein încă de pe atunci știa că teoria luminii, a lui Maxwell, nu poate fi decît o aproximare a realității; aceasta o arată lucrarea sa despre cuantele de lumină, care a apărut în același an, 1905, ca și teoria relativității.

Problemele cuantelor de lumină au fost de asemenea examinate în convorbirile noastre. Einstein era profund neliniștit de dualitatea undă-particulă, care apare aici pentru prima oară. Interpretarea statistică imediată, în prezent unanim acceptată nu numai pentru lumină, dar și pentru electroni și celelalte particule, conform căreia pătratul amplitudinii undei determină densitatea de probabilitate a apariției particulelor, el a exprimat-o încă de pe atunci, dar a respins-o îndată, pentru că se menținea la descrierea strict cauzală, deterministă, a fizicii clasice. Despre aceasta voi mai vorbi.

Teoria relativității generale se întemeiază pe o aplicare a aceluiași principiu filozofic ca și teoria restrînsă. Este vorba de generalizarea ideii de relativitate la sisteme de referință accelerate. Einstein a descoperit cheia în faptul cunoscut încă de pe vremea lui Newton că într-un cîmp gravitațional toate corpurile au aceeași accelerație sau că, după cum se zice, masa gravitațională și cea inerțială sînt egale. De aici rezultă că un observator care se află într-o ladă închisă nu poate nicicum să-și dea seama dacă miș-

carea accelerată a unui corp din ladă este generată de un câmp gravitațional exterior, lada fiind în repaus, sau de accelerația lăzii în întregul ei, în absența câmpului gravitațional. Încă în anul 1907, Einstein a ajuns astfel la formularea principiului său de echivalență, conform căruia, greutatea și accelerația ar fi indiscernabile pentru toate procesele naturii, adică interpretări diferite ale acelorași stări de lucruri. Dar au fost necesare eforturi de mulți ani, pînă prin 1915, pentru a transforma aceleași idei într-o teorie încheiată. În colaborare cu Marcel Grossmann, un vechi prieten al său de studii, el a găsit instrumentul matematic adecvat în geometria riemanniană și dezvoltarea ei de către Ricci și Levi-Civita. Teoria relativistă a gravitației a lui Einstein este desigur cea mai mare realizare a gîndirii omenești despre natură, o îmbinare uimitoare a profunzimii filozofice, a intuiției fizice și a măiestriei matematice.

Pentru noi, care ne-am format în credința dogmatică a secolului al XIX-lea față de mecanica lui Newton, asimilarea ideilor lui Einstein nu a fost ușoară și nu fiecare a avut ca mine norocul de a învăța direct de la dînsul. În pofida acestui avantaj nu m-am încumetat niciodată în domeniul relativității generale. Mi s-a părut prea grandios și mai presus de puterile mele, dar și prea îndepărtat de fizica obișnuită și prea puțin ancorat în observație.

Explicarea mișcării periheliului lui Mercur este unica confirmare empirică cu totul necontestată; ambele efecte optice verificabile (devierea luminii stelare, datorită Soarelui și deplasarea spre roșu a liniilor spectrale) sînt neîndoielnice, dar despre concordanța cantitativă dintre teorie și observație se mai discută încă. Însemnătatea propriu-zisă a teoriei relativității generale rezidă în cosmologie: doctrina despre existența și devenirea universului. Impulsul l-a dat Einstein însuși printr-o lucrare din 1907, la a cărei geneză am asistat încă la Berlin; acolo se propunea o generalizare a ecuațiilor câmpului gravitațional (prin introducerea așa-numitului termen cosmologic), care admite ca soluție un spațiu închis finit — o idee extrem de îndrăzneată și importantă. Datorită ei, pretenția lui Ernst Mach de a considera legea inerției nu ca proprietate a spațiului vid, ci ca rezultat al interacțiunii tuturor corpurilor lumii

a căpătat un sens fizic ; ea rezolvă enigma de ce sistemul stelar nu s-a dispersat de mult în infinit. Și, în sfârșit, tot ea conducea la interpretarea unor observații astronomice cu totul noi. Astronomul american E. P. Hubble descoperise că nebuloasele slabe, care nu sînt de fapt decît sisteme stelare de aceeași mărime cu calea noastră lactee, arată o deplasare spre roșu a liniilor spectrale, deplasare care este cu atît mai mare, cu cît sînt ele mai îndepărtate. Dacă această deplasare este interpretată ca efect Doppler, se ajunge la concepția că întregul sistem stelar se dilată uniform în timp. Or, există într-adevăr soluții ale ecuațiilor de câmp ale lui Einstein care corespund unui asemenea proces¹. Aici și-a serbat teoria relativității cel mai mare triumf al său și și-a găsit contactul cu experiența.

Dar pe atunci, la Berlin, nu presimțeam încă nimic despre această confirmare minunată a ideilor lui Einstein. Ele erau pure speculații care-l abăteau, și în urma lui mă abăteau și pe mine de la necazurile și grijile vieții cotidiene. Să nu uităm că în acest timp în lume războiul era în toi, eram înconjurați de suferințe, foame și pericole, iar convorbirile noastre lunecau destul de des spre politică și evenimentele mondiale.

Este greu să vorbesc despre aceasta, căci vederile lui Einstein nu concordau de fel cu vederile unui bürger german obișnuit. El avea propriul său drum în cele umane, sociale și politice ca și în știință. Permiteți-mi să arunc aici o privire asupra biografiei sale.

Einstein s-a născut la Ulm, la 14 martie 1879, dar părinții săi s-au mutat încă în 1880 la München. Ei erau evrei, dar cu totul nereligioși, astfel că pe fiul lor l-au trimis la o școală primară catolică. El și-a manifestat de timpuriu dorința nestăvilită de independență. Ura jocul de-a soldații, deoarece acest joc însemna constrîngere. După cum povestea el însuși, încă din tinerețe și-a dat seama de nimicnicia speranțelor și aspirațiilor oamenilor, care, după cum se exprima el, goneau toată viața, fără răgaz, pentru a-și satisface stomacul, în timp ce ideile și

¹ La descoperirea acestor soluții au contribuit, în afară de Einstein, W. de Sitter (1917), H. Weyl (1923), A. Friedmann (1922), G. Lemaître (1927), H. P. Robertson (1929).

sentimentele erau strivite. „O primă soluție era religia, care de altfel era înrădăcinată fiecărui copil prin mecanismul tradițional de educație“. Astfel ajunge el în copilărie la o religiozitate profundă, dar care se încheie brusc la vârsta de 12 ani. Citez din scurta sa autobiografie (ALBERT EINSTEIN, *Philosopher and Scientist*, Library of Living Philosophers, vol. 7, Editura W. Kohlhammer), pe care o numește autonecroglog : „Lectura cărților de popularizare științifică m-a adus în curînd la convingerea că multe din povestirile biblice nu pot fi adevărate. Rezultatul a fost că am devenit un liber-cugetător de-a dreptul fanatic, condus de impresia că tineretul este mințit cu bună știință de către stat ; a fost o concluzie zdrobitoare. Aceasta m-a condus la lipsa de încredere în orice fel de autoritate, la o poziție sceptică față de convingerile care înfloreau în ambianța socială de pe atunci — o poziție care nu m-a mai părăsit niciodată, chiar dacă mai târziu am înțeles mai bine conexiunea cauzală“. Paradisul religios, pierdut în acest fel, a fost prima sa încercare de a se elibera din cătușele a ceea ce este „exclusiv personal“. Acum, ca țel suprem îi plutea în minte, în parte conștient, în parte inconștient, cuprinderea mintală a lumii extrapersonale, în cadrul posibilităților care ne sînt date. El a definit gîndirea creatoare ca aptitudinea de a se mira, de a vedea minunea în cotidian. El a trăit în copilărie o asemenea minune la vârsta de 4 sau 5 ani, cînd tatăl său i-a arătat o busolă. Faptul că acest ac își păstrează direcția fără o influență exterioară vizibilă arăta că în spatele lucrurilor trebuie să fie ceva profund ascuns. La vârsta de 12 ani el s-a întîlnit cu o minune întrucîtva diferită, sub forma unei broșuri despre geometria euclidiană a planului, din care a aflat că lucruri care nu sînt de loc evidente (ca de exemplu, concurența celor trei înălțimi ale unui triunghi) se pot demonstra cu atîta certitudine, încît orice dubiu pare exclus.

Avem aici rădăcinile ființei sale intelectuale : independență totală față de autorități, indiferență față de avantaje materiale, capacitate de a se minuna de fenomene naturale simple și credința în puterea gîndirii analitice. Dar la ele se mai adaugă trăsăturile vieții sale afective : interesul pentru soarta oamenilor și promptitudine

în ajutorare, dar în același timp reținere totală în ceea ce privește încadrarea într-o comunitate ; dragoste pentru tot ce e frumos în artă și natură, mai ales în muzică.

N-a mai revenit niciodată la credința într-un dumnezeu personal. Mai târziu s-a convertit la dumnezeul lui Spinoza, care se revelează prin legile lumii naturale. Într-un studiu din anul 1940, *Wissenschaft und Religion* (Știință și religie), el spune : „De religie ține credința că lumea fenomenelor este guvernată de legi ale rațiunii și că această lume poate fi cuprinsă de rațiune. Nu pot să concep un adevărat om de știință care să fie lipsit de această credință solidă. Această situație poate fi prezentată intuitiv prin următoarea imagine : știința fără religie este paralizată, iar religia fără știință este oarbă“.

În autobiografia de care am amintit, Einstein vorbește mult despre dezvoltarea sa spirituală, dar nu pomeniște nici un cuvânt despre viața sa exterioară. De aceea, și eu voi aminti aici din viața lui numai acele lucruri care ne apropie de înțelegerea firii sale. Printre acestea este faptul că la plecarea sa el a renunțat la cetățenia germană și totodată a părăsit comunitatea religioasă evreiască. În Elveția el se simțea bine, și mai târziu a devenit cetățean elvețian. După ce a trecut, răbdînd de foame, prin școala cantonală din Aarau și Politehnica din Zürich, el a căpătat în 1902 un mic post la biroul elvețian al patentelor din Berna, datorită căruia a scăpat pentru prima oară de mizerie neagră. Acolo au apărut marile sale lucrări, pe care le-am amintit la început. Apoi urmă o ascensiune rapidă, catedrele de la universitățile din Zürich și Praga, Politehnica din Zürich, și în sfîrșit, invitația la Academia din Berlin.

N-a revenit în Germania cu inima ușoară. Max Planck și Walter Nernst au trebuit să plece personal la Zürich pentru a-l convinge. Strălucirea Academiei Prusiei, posibilitatea de a lucra în știință fără obligații didactice și de a face schimb de idei cu cei mai buni specialiști, în sfîrșit, și motive personale — o căsătorie încheiată timpuriu devenise nefericită — au covîrșit ezitățile sale.

La academie și la universitate a găsit tot ce așteptase. Nu se poate spune nici că se simțea străin sau singur ; oriunde era, trăia în felul său propriu, spartan, amical cu

toată lumea, dar atent să-și păstreze independența. Când, la un an după mutarea sa, se dezlănțui războiul, el privi însuflețirea sălbatică a maselor cu un surîs dureros și a refuzat să semneze cunoscutul „manifest al celor 92 intelectuali germani“, în care aceștia se solidarizau cu militarismul german. Numai faptul că era elvețian l-a salvat de a fi stigmatizat ca trădător.

Încă de pe atunci începură să se formeze partide pentru și contra sa. Deși nu-și ascundea niciodată opiniile, nici nu le impunea nimănui. Dar se știa că este pacifist, că soluțiile militare le consideră ca lipsite de sens și că nu crede într-o victorie germană. Spre sfârșitul războiului, un grup de persoane remarcabile, printre care și istoricul Delbrück, economistul Brentano, Einstein și alții au organizat întâlniri serale la care erau invitați funcționari superiori de la Ministerul de Externe. La ordinea de zi era în primul rând războiul submarin nelimitat, pe care îl pretindea Marele Stat-Major și care în mod greșit trebuia să conducă la intrarea Americii în război. Einstein m-a convins să particip la aceste ședințe, ceea ce de fapt, ca ofițer, nu ar fi trebuit să fac. Am fost unul dintre cei mai tineri în acest cerc și n-am deschis niciodată gura. Einstein însă vorbea adesea, liniștit și clar, ca și cum ar fi fost vorba de fizică teoretică. Încercările de a influența modul de conducere al războiului n-au folosit la nimic, și evenimentele și-au urmat cursul.

De la prima sa vizită în casa noastră Einstein și-a adus vioara, pentru a cânta cu mine sonate pentru vioară. Pe soția mea, pe care n-o cunoscuse, a salutat-o spunându-i : „Să vă trăiască noul-născut !“. Apoi și-a scos însemnările, le-a aruncat într-un colț și a început să scîrțîie la vioară. Pe atunci, compozitorul său preferat era Haydn. O dată, într-o iarnă, soția mea l-a invitat pe Einstein la o mîncare bună, întîmpinîndu-l cu următoarele versuri :

Cum spuse Newton altădat'
O piatră-n zbor accelerat
Mînată-n spațiu, dacă-i gol,
Pe-o orbită rectilin
Nu mai face nici un ocol
Și dispăre pe deplin.

Ce spuneți este mai voios,
 Și spațiul ce se-ncovoaie
 O piatră ¹-n zboru-i furios,
 Când cu o stea se întretaie
 Se-nvîrte-acolo-n sus și-n jos,
 Căci spațiu-i foarte sinuos.
 Einstein în traiectoria sa
 De casa Born se apropia
 (oricît de rău îi pare)
 Unde substanță are :
 Visează o șuncă grasă
 Să veniți și dacă vreți
 Să o consumați la masă,
 Spre salvarea celor drepti.
 Pînă din nou ne vizitați
 Nu an marțian să așteptați !
 Veniți ca Haydn-misionar
 Peste un scurt an Einsteinean !

Această prezentare poetică a relativității generale redă bine tonul vesel și nevinovat al întîlnirilor noastre. Uneori și Einstein se exprima în versuri comice. Relațiile cu el dădeau o senzație de fericire, pentru că simțeau cît de complet independent era el de propriul său Eu. O dată, pe cînd era serios bolnav, soția mea l-a întrebat dacă nu-i este frică de moarte ; el răspunse : „Mă simt atît de solidă cu tot ce trăiește, încît îmi este indiferent unde începe și unde se sfîrșește persoana mea particulară“. S-a însănătoșit datorită îngrijirii devotate a verișoarei sale Elsa, care apoi a devenit a doua sa soție. Datorită ei, viața sa a devenit mai burgheză. Dar și în gospodăria bine îngrijită a doamnei Elsa el și-a păstrat obiceiurile sale spartane. În mica sa cameră nu era nici o cuvertură, nici un covor și nici un tablou ; numai un pat, o masă, un scaun, un raft pentru cărți cu cîteva cărți și cîteva legături cu extrase. Pentru dînsul, orice avut era o povară, iar în tendința spre avut vedea el cauza cea mai adîncă a vrajbei și războiului între oameni. Cultul puterii de stat și al realizărilor tehnice îi repugnau tot atît de mult ca militarismul

¹ Joc de cuvinte : Ein Stein = o piatră.

și fascismul. Cu puțin înainte de moarte, mi-a amintit într-o scrisoare de o mică aventură care a avut loc la sfârșitul războiului, în noiembrie 1918.

O parte a orașului Berlin era în mîna sovietelor muncitorești și soldățești (Arbeiter- und Soldatenräte). Studenții, care își formaseră și ei un asemenea soviet, au ocupat universitatea și multe institute, și l-au închis pe rector și pe cîțiva profesori. Einstein despre care se considera că are influență la studenți, a fost rugat să mijlocească. El m-a chemat și m-a rugat să-l conduc. Ieșisem tocmai dintr-o gripă grea, datorită subnutriției, eram în convalescență și nu prea voinic. Tramvaie și autobuze nu circulau atunci. Dar eu am promis, și la timpul convenit am parcurs drumul lung, din suburbia îndepărtată în care locuiam, la locuința lui Einstein, din cartierul bavarez. Acolo ni s-a alăturat un al treilea, Max Wertheimer, unul din întemeietorii psihologiei configurațiilor (*Gestalt — Pshychologie*). Am pornit împreună pe străzile neumblate, pe drumul lung, spre palatul Reichstagului unde lucrau sovietele. Era încercuit de o uriașă și agitată mulțime de oameni, prin care era greu să treci. Și mai dificil a fost să trecem pe lîngă paznicii cu banderole roșii. Pînă la urmă, am reușit cu ajutorul unui ziarist, care îl cunoștea pe Einstein. Prin lungi coridoare am ajuns la o mică sală de ședințe, în care își ținea ședința sovietul studenților. După un scurt salut, președintele ne-a rugat să luăm loc și să așteptăm un pic, deoarece ei erau tocmai ocupați cu lucruri importante: reglementarea vieții studențești. Așa că ne-am așezat și am ascultat; timpul trecea. În sfârșit, Einstein și-a pierdut răbdarea și a întrebat politicos dacă nu s-ar putea rezolva cererea noastră simplă. Speram că da, dar președintele întrebă dacă Einstein n-ar vrea să-și spună părerea cu privire la noile reglementări. Cu zîmbet prietenos, Einstein spuse cam următoarele: „Studenții germani mi s-au părut totdeauna demni de invidie, din cauza libertății lor academice. Mi-ar părea rău dacă aceasta s-ar înlocui prin prescripții și restricții“. Tăcere confuză a tînărului legislator. În problema noastră ei s-au declarat incompetenți și ne-au trimis către noul guvern. Ar fi prea mult dacă aș relata cum am ajuns pe Willhelmstrasse și cum am intrat

în palatul cancelarului, unde grupuri agitate de deputați și funcționari discutau situația internă și condițiile de armistițiu, care tocmai fuseseră anunțate. Îndată ce Einstein a fost recunoscut, ușile ni s-au deschis; am putut ajunge la Ebert și să-i expunem problema noastră. Iar apoi începu nesfârșitul drum de întoarcere. Dar cele întâmplate au meritat osteneala.

În curînd, după aceasta, am părăsit Berlinul și m-am mutat la Frankfurt; astfel au încetat legăturile mele strînse cu Einstein. Dar am continuat să ne scriem regulat și ne vedeam des. Era epoca cînd Einstein dobîndise brusc glorie mondială și devenise centrul unor polemici științifice și politice aprige.

Pînă atunci, teoria relativității a fost o chestiune a fizicienilor și a unor filozofi care se interesau de fizică. Acum ea deveni dintr-o dată un obiect de interes general, despre care ziarele publicau titluri senzaționale pe prima pagină. Din inițiativa lui sir Arthur Eddington, englezii au organizat îndată după război cîteva expediții pentru a observa eclipsele solare, în vederea verificării afirmațiilor lui Einstein cu privire la devierea luminii în cîmpul gravitațional al Soarelui. La 6 noiembrie 1919, într-o ședință solemnă la Royal Society, s-a anunțat rezultatul: confirmarea deplină a previziunii lui Einstein. Impresia a fost extraordinară. Doctrina lui Isaac Newton, pe care Royal Society îl considera pe bună dreptate ca cel mai mare dintre președinții ei, trebuia, după 200 de ani de valabilitate absolută, să cedeze locul unei teorii mai adînci. Englezii aveau vederi destul de largi pentru a furniza prin propriile lor eforturi și cheltuieli materialul demonstrativ necesar. Caracterul internațional al științei s-a confirmat și barierele politice au fost depășite. Oamenii, care în anii de nevoie, de luptă criminală, de minciună și defăimare și-au pierdut orice încredere în valorile superioare, au găsit o nouă speranță în apariția unui om simplu și modest, care în mijlocul acestui infern își bătea în liniște capul cu natura spațiului, timpului și materiei și dăduse puțin la o parte vălul care acoperea secretele creației. Fiecare voia să știe cum stau de fapt lucrurile cu relativitatea. Dar nu era de loc simplu. Au apărut nenumărate scrieri și cărți despre teoria lui Einstein. Și eu am scris o carte, pe atunci

mult citită, și care de altfel în prezent, după 35 de ani, va apare din nou în America într-o ediție engleză modernizată. Dar și adversarii erau mulți. Printre ei erau oameni cinstiți, care țineau la reprezentările tradiționale, din motive de convingere interioară, dar erau și alții care nu puteau suporta atitudinea umană și politică a lui Einstein, originea sa evreiască, simțul său de libertate, antimilitarismul și pacifismul său. Din păcate, între acești potrivnici, care amestecau știința și politica, se numărau și câțiva fizicieni germani de seamă, în primul rînd Philipp Lenard și Johannes Stark. În 1921, la Congresul cercetătorilor naturii de la Bad Nauheim au avut loc controverse foarte neplăcute. Einstein locuia pe atunci în casa mea de la Frankfurt. Și de fapt a fost singura dată cînd l-am văzut cumplit de necăjit. De obicei, își păstra întotdeauna singele rece și seninătatea. Știa totuși că toți specialiștii mai buni sînt de partea lui. Fizica teoretică germană era pe atunci la apogeu. La Berlin se aflau în același timp Albert Einstein, Max Planck și Max von Laue, iar cînd în 1928 Planck s-a retras de la catedră, a mai venit și Schrödinger. Ce ghirlandă de nume strălucite! Între Einstein și ceilalți s-a înfiripat o prietenie care a străbătut peste toate meandrele vieții particulare și politice. Ori de cîte ori a fost necesar, prietenii au ajutat la respingerea atacurilor îndreptate împotriva lui Einstein. Treptat, ele s-au liniștit, cel puțin la suprafață; fizica a devenit în întregime relativistă; amintesc doar generalizarea relativistă a lui Sommerfeld a teoriei lui Bohr cu privire la atomul de hidrogen; iar unii filozofi, care nu se puteau împăca cu aceasta, s-au retras pe poziția că metafizica nu trebuie să se preocupe de reprezentările banale ale cercetătorilor naturii. Astfel, viața și munca lui Einstein la Berlin au fost liniștite și în ansamblu satisfăcătoare. Dar sub cenușă mocnea dușmănia față de el, pînă ce a izbucnit apoi deschis în 1933.

În această perioadă a început Einstein lucrările sale de teorie unitară a cîmpului. Despre ele însă nu vreau să spun nimic, deoarece nu am crezut cu adevărat în programul său de unificare într-un singur formalism al cîmpului gravitațional și electromagnetic, și de aceea nu am studiat amănunțit lucrările respective. Aș vrea însă să

amintesc contribuțiile fundamentale ale lui Einstein la teoria cuantelor. În anul 1913 a apărut interpretarea cuantică a lui Bohr a structurilor atomice și a spectrelor lor. Acum nu mai încăpea nici un dubiu că ideile fundamentale ale teoriei cuantice erau juste. Mecanica clasică s-a dovedit lipsită de valabilitate în domeniul fenomenelor atomice și trebuia căutată o nouă mecanică. În legătură cu aceasta, Einstein spunea în „autonecrologul” amintit: „Toate încercările mele de a pune de acord fundamentul teoretic al fizicii cu aceste rezultate au eșuat în întregime. Era ca și cum i-ar fugi cuiva terenul de sub picioare, fără să vadă undeva vreun teren solid pe care să poată construi. Faptul că această fundație nesigură și contradictorie era suficientă pentru a pune un om, cu neasemuitul instinct și simț. al lui Bohr, în situația de a găsi legile principale ale lumilor spectrale și ale învelișului electronic al atomului precum și semnificația lor pentru chimie mi-au apărut ca o minune, și chiar astăzi continuă să-mi apară ca o minune. Aceasta este muzicalitatea supremă în domeniul gândirii”.

În teoria lui Bohr se renunță la cauzalitatea clasică în ce privește procesele de emisiune și absorbție a luminii. Salturile cuantice între stările staționare pot fi descrise doar statistic, într-un mod analog cu cunoscuta teorie a descompunerii radioactive.

Deși Einstein n-a crezut nici un moment că astfel ultimul cuvânt ar fi fost spus, el a sprijinit totuși această concepție atunci când, în 1916, a arătat că legea radiației, a lui Planck, poate fi dedusă din statistica trecerilor de la o stare staționară la alta. Aceste considerente se aflau în întregime pe linia care a condus pînă la urmă la mecanica cuantică a lui Heisenberg.

O altă lucrare a lui Einstein, din anul 1924, poate fi considerată ca o precursoră a mecanicii ondulatorii a lui Schrödinger. Indianul Bose reușise să arate că printr-o modificare a stărilor considerate ca egal probabile ale unui gaz fonic, formula lui Planck cu privire la radiație poate fi interpretată ca ecuație de stare termică a acestui gaz. Einstein a extins această statistică a lui Bose la gazele obișnuite și a ajuns astfel la ideea degenerării gazului. Examinarea oscilațiilor energiei într-un gaz degenerat

l-a condus la înțelegerea faptului că aici, la fel ca la radiații, are loc un proces cu caracter simultan corpuscular și ondulatoriu, așa cum prezisese De Broglie, pe baza unor cu totul alte considerente. Astfel, cercetarea lui Einstein este legată în modul cel mai profund cu ambele direcții de idei, care au condus la mecanica cuantică de astăzi.

Dar când ea a luat naștere la Göttingen în anul 1926, Einstein a respins-o cu multă răceală. La 12 decembrie 1926 el îmi scria: „Mecanica cuantică impune mult respect. Dar o voce interioară îmi spune că totuși nu este Iacob cel adevărat. Teoria furnizează multe, dar nu ne apropie de taina Bătrînului. În orice caz, eu sînt convins că el nu joacă zaruri“.

Această poziție negativă el a menținut-o pînă la urmă, în pofida tuturor triumfurilor mecanicii cuantice și a dezvoltării ei ulterioare — electrodinamica cuantică. Credința într-o lume obiectivă independentă de subiectul observator a stat la baza evoluției sale științifice. El înțelegea prin aceasta nu numai valabilitatea unor anumite legi riguroase (pe care nu le va nega nici un fel de filozofie a științelor naturii), dar și cerința că în lume, la fiecare moment dat, să existe o anumită stare, bine determinată, și ca fiecare stare să fie pe deplin determinată de starea precedentă. El cerea ca descrierea teoretică să pornească de la ideea unei asemenea lumi obiective, iar cercetarea științifică să rezide într-o stabilire tot mai exactă a dezvoltării adevărate a lumii. Este remarcabil că el știa să îmbine cu această credință convingerea că legile naturii nu pot fi deduse în mod logic din observații, ci sînt creații, respectiv convenții libere ale cercetării. El credea, de asemenea, că spiritul uman are capacitatea de a ghici pas cu pas tainele creației cu ajutorul interpretării fenomenelor.

Fizica cuantică s-a dezis de această filozofie nu din cauza vreunei tendințe revoluționare, ci sub presiunea experienței. Ideea caracterului obiectiv și determinat al lumii a cedat locul unei concepții statistice, în cadrul căreia nu mai poate exista o separare univocă între obiect și subiect. Eu am luat parte la această dezvoltare, și astfel s-a putut întîmpla ca Einstein să-mi scrie într-o zi că

în vederile noastre științifice am evoluat la antipodii. Noi am corespondat cu privire la aceste probleme pînă aproape de moartea lui. Dar niciodată prietenia noastră n-a suferit din această cauză.

Deși majoritatea covârșitoare a fizicienilor a adoptat interpretarea statistică a fizicii, deși Niels Bohr, Pauli, Heisenberg și alții au încercat să respingă obiecțiile lui Einstein în cadrul unor convorbiri ample, el s-a menținut la concepția sa că nu poate fi vorba decît de un provizorat. În autonecrologul său, de care am amintit deja în mai multe rînduri, el vorbește într-un loc despre scepticii care, ca Mach și Oswald, respingeau ideea de atom: „Acesta este un exemplu interesant pentru felul în care chiar un cercetător cu spirit îndrăzneț și cu intuiție fină poate fi împiedicat în interpretarea faptelor de prejudecăți filozofice“. Mi se pare că în ce privește mecanica cuantică, aceasta i se potrivește lui însuși. În ultimul timp, m-am ocupat întrucîtva cu problema dacă mecanica clasică reprezintă oare într-adevăr idealul determinismului obiectiv al lui Einstein. Dacă acceptăm principiul euristic utilizat în mod atît de reușit de Einstein însuși, după care în fizică nu au ce căuta aserțiunile principial neobservabile, atunci ajungem la concluzia că și în mecanica clasică determinismul este numai aparent, fiind o iluzie provocată de un raționament matematic discutabil.

După 1932 nu l-am mai văzut pe Einstein niciodată. Cînd Hitler a venit la putere, el era în America. S-a întors în Europa, dar n-a mai călcat în Germania, ci s-a oprit în Belgia. De acolo a trimis o scrisoare către Academia Prusiei, în care își anunța ieșirea din această academie. 'El știa că adversarii săi sînt la putere și că insistă pentru excluderea sa; voia să-i menajeze de umilință pe Planck și pe Nernst, care l-au adus la Berlin și care au ținut întotdeauna la el.

Prefer să trec peste tot ce a mai urmat în acele zile întunecate: arderea cărților sale, excluderea din celelalte academii și societăți științifice ș.a.m.d.

Einstein și-a găsit în America o nouă patrie. A obținut o situație strălucită la Institutul de cercetări nou creat de la Princeton (Institute for Advanced Study). Acolo a putut să trăiască și să lucreze liniștit. Deoarece în cursul

acelor ani n-am fost niciodată în America, n-aş putea să povestesc nimic după impresii proprii. Scrisorile sale nu se refereau niciodată la chestiuni personale, ci totdeauna la problemele ştiinţei şi cunoaşterii. Chiar şi marile evenimente politice în care era amestecat abia de erau amintite. Recăderea în barbaria preistorică, care s-a produs în centrul Europei, el o prevăzuse. Pieirea evreilor din Europa centrală, cărora le aparţinea prin originea sa, l-a zguduit puternic. El a luat poziţie în favoarea mişcării sioniste, dar desigur că nu din motive de rasă, naţiune sau religie, ci din pură omenie, pentru că nu exista alt loc de refugiu pentru cei persecutaţi. Pentru realizările din Palestina el a arătat multă admiraţie. Dar când, după moartea lui Waizmann, i s-a propus funcţia de preşedinte al noului stat Israel, el a refuzat.

Caracterul tragic al ultimilor săi ani a culminat în amestecul său în problema bombei atomice. Cu aproape 40 de ani în urmă, el derivase din teoria relativităţii formula $E=Mc^2$ pentru echivalenţa şi transformarea reciprocă dintre masa (M) şi energia (E) (c fiind viteza luminii), dându-şi seama de semnificaţia ei cu mult înainte de a se fi conceput vreo verificare experimentală, fără a mai vorbi de vreo aplicaţie tehnică. Acum exista această posibilitate, şi prin aceasta şi pericolul ca Hitler să pună mâna pe cel mai groaznic mijloc de distrugere, în vederea înrobirii lumii. Aceasta l-a determinat să semneze cunoscuta scrisoare către preşedintele Roosevelt, care a impulsionat apariţia bombei atomice şi, prin urmare, a dus la actuala situaţie îngrozitoare şi grotescă, când omenirea, deşi încă nu este coaptă pentru o pace durabilă, nu are decît alegerea între pace şi autodistrugere. Dar despre ideile lui Einstein în această privinţă eu nu ştiu nimic mai mult decît ceea ce a devenit în general cunoscut prin ziare şi cărţi. Permiteţi-mi să închei cu câteva rînduri extrase dintr-o scrisoare a fiicei sale vitrege Margot către soţia mea, în care ea relatează sfîrşitul său (el a murit la 18 aprilie 1955). „Ştii că eu am fost internată în acelaşi spital în care se afla Albert? Am avut posibilitatea de a-l mai vedea şi de a-i vorbi de două ori, timp de cîteva minute. M-au dus la dînsul în fotoliul meu de spital. La început nu l-am recunoscut, atît era de

schimbat din cauza durerilor și a lipsei de sînge din obraz. Dar felul său de a fi era neschimbat. S-a bucurat că arătam ceva mai bine, a glumit cu mine și a privit situația cu o liniște deplină ; a vorbit cu o liniște adîncă — ba chiar cu un umor ușor despre medici, și își aștepta sfîrșitul ca pe un „eveniment al naturii“ care urma să aibă loc. Pe cît de neînfricat fusese în viață, pe atît de liniștit și discret era în fața morții. Fără nici un fel de sentimentalism și fără regrete a plecat din această lume“.

Din postfața cărții
The Restless Universe
 (1951)

Am ajuns la capătul călătoriei noastre în adâncurile materiei.

Am căutat un punct în repaus și n-am găsit nici unul. Cu cît mergem mai adînc, cu atît universul devine mai neliniștit, mai nedeterminat și mai nebulos. I se atribuie lui Arhimede exclamația plină de mîndrie: „dați-mi un punct de sprijin și voi răsturna întreaga lume“. Dar un asemenea punct nu există. Totul este în mișcare și într-un dans sălbatic. Totuși, nu numai din această cauză depășește exclamația lui Arhimede granițele impuse omului. A scoate lumea din țîțîni ar fi împotriva legilor ei riguroase și imuabile.

Setea de cunoaștere a cercetătorului, ca și fanatismul credinciosului sau inspirația artistului este o expresie a năzuințelor omului după ceva durabil, a dorului după un liman în vîltoarea evenimentelor: Dumnezeu, Frumusețe, Adevăr.

Scopul cercetătorului este cunoașterea adevărului. Dar el nu găsește nicăieri ceva stabil și durabil. Nu totul poate fi cercetat, și cu atît mai puțin prezis. Dar omenirea este în stare să cuprindă și să înțeleagă cel puțin o parte a creației. În plină curgere a fenomenelor, legile naturii sînt de neschimbat și de nezdruccinat.

POSTFAȚĂ

În cei 15 ani care au trecut de la aceste ultime rînduri, au avut loc evenimente mari și înfricoșătoare. Dansul atomilor, al electronilor și nucleelor, care în toată sălbăticia lui se supune totuși legilor veșnice ale lui Dumnezeu, s-a

încurcat în evenimentele unei alte lumi neliniștite, care pare să fie lumea dracului : în lupta dintre oameni, pentru putere și dominație, pe care se întemeiază istoria. Credința mea optimistă în ce privește căutarea adevărului de dragul lui însuși a fost puternic zguduită, și acum nu pot decât să dau din cap în fața naivității mele când recitesc rîndurile pe care le scriam cu privire la realizarea modernă a visului alchimiştilor : „Astăzi însă, motivul care ne pune în mișcare nu este lăcomia de bani, camuflată în haina secretă a artei magice, ci aspirația pură a cercetătorului spre știință. Căci de la bun început este clar că pe acest drum nu vom agonisi nici un fel de averi“.

Aurul înseamnă putere, puterea de a domina și de a participa la bogățiile acestei lumi. Dar alchimia modernă înseamnă chiar un drum și mai rapid către acest țel, ea acordă puterea nemijlocită — puterea de a domni, de a asupri și de a nimici într-o măsură pînă acum nemaiîntîlnită. Și am devenit într-adevăr martorii exercitării acestei puteri în purtarea lipsită de scrupule a războiului, în distrugerea unor orașe întregi și în nimicirea populației lor. E adevărat că asemenea lucruri s-au obținut și cu ajutorul altor mijloace, că în același război și alte orașe, în afară de Hiroshima, au fost nimicite o dată cu cea mai mare parte a populației lor, chiar dacă materiile explozive obișnuite au realizat această operă a distrugerii ceva mai încet. Fiecare război nou a adus un „progres“ în ce privește mijloacele de distrugere, și aceasta începînd din epoca de piatră, atunci cînd topoarele de piatră și vîrfurile de piatră ale săgeților au fost înlocuite cu armele de bronz. Și totuși, există o deosebire. Cu toate că și înainte orașe, populații și civilizații întregi erau nimicite din cauza luptei pentru supremație, totuși rămîneau întotdeauna regiuni întinse care nu erau atinse de loc și era loc destul pentru o nouă evoluție. Astăzi însă pămîntul a devenit mic și rasa umană se află în fața pericolului auto-nimicirii.

Cînd s-a pus problema unei noi ediții a acestei cărți, pur și simplu n-am știut ce să fac. Pentru a o aduce la stadiul actual al cercetării, ar fi trebuit să scriu o dare de seamă despre evoluția fizicii începînd cu anul 1935.

Dar deși acest interval de timp este plin de cele mai minunate descoperiri, idei și teorii, n-aș fi putut totuși vorbi despre ele pe același ton în care e scris începutul cărții, adică în credința că pătrunderea mai adâncă în atelierul naturii ar fi primul pas spre o concepție mai rezonabilă despre lume și spre înțelepciune în viață. Mi se pare că cercetătorii, a căror muncă a condus pînă la urmă la descoperirea bombei atomice, deși au fost oameni de știință extraordinar de dotați, ba chiar geniali, n-au fost însă oameni înțelepți. Roadele descoperirilor lor ei le-au pus necondiționat la îndemîna politicianilor și militarilor, pierzîndu-și astfel integritatea morală și libertatea spirituală.

La 16 iulie 1945 a avut loc prima explozie experimentală a bombei atomice în apropiere de Los Alamos, la New Mexico. E indubitabil că a fost unul dintre marile triumfuri ale fizicii și tehnicii nu numai în ce privește consumul de ingeniozitate și fantezie, ci și în ce privește cheltuielile de bani, muncă științifică colectivă și organizare industrială. Nici un fel de preexperiment nu era posibil, s-a mers la un risc uriaș cu încrederea în exactitatea calculelor teoretice efectuate pe baza experiențelor de laborator. De aceea, nu este de mirare că fizicienii care au fost martorii acestui infricoșător spectacol al primei explozii nucleare au simțit mîndria și marea ușurare de a se fi eliberat de o grea răspundere. Ei au adus un mare serviciu patriei lor și națiunilor aliate.

Dar cînd peste cîteva săptămîni două „bombe atomice“ au fost aruncate asupra Japoniei și orașele, dens populate, Hiroshima și Nagasaki au fost distruse, oamenii de știință au trebuit să descopere că pe umerii lor apăsa o răspundere mult mai mare și mai adîncă.

Lumea devenise insensibilă față de ororile războiului. Ceea ce semănase Hitler dădea rod. El a fost executorul „războiului total“, bombele sale au „șters“ de pe fața pămîntului Rotterdam și Coventry. Dar a găsit elevi destoinici. Bombele aruncate de ambele părți au reușit să distrugă în mod sistematic întreaga Europă centrală. A fost cuprinsă în flăcări o mare parte a monumentelor sale istorice și a comorilor sale de artă, moștenirea a mii de ani. O bijuterie a arhitecturii, cum era Dresda, a fost

distrusă încă în ultimele zile ale războiului european. Au pierit atunci o sută de mii de vieți omenești, cu toții civili — bărbați, femei și copii. Desigur că autoritățile responsabile pot să justifice cu argumente tactice și strategice. Și toată lumea a găsit destule scuze, de la ura oarbă și dorința de represalii, pînă la scuza cvasiumană, după care toate mijloacele sînt justificate dacă pot să aducă o terminare mai rapidă a războiului. Iată pînă unde a coborît nivelul nostru etic !

Și totuși, cele două bombe atomice aruncate asupra Japoniei au zguduit lumea, iar cînd au început să fie cunoscute amănunte cu privire la tragedia umană care a avut loc acolo, în multe părți ale lumii s-a putut observa un fenomen de trezire a conștiinței.

Nu este aici locul să-mi exprim opinia personală cu privire la bărbații de stat care au luat decizia de a folosi un asemenea mijloc al forței brutale. Există destule precedente, și nu este o deosebire esențială dacă într-o noapte se ucid 20 000 de oameni sau într-un minut, 50 000. Dar în calitate de fizician, mă neliniștește întrebarea : în ce măsură fizica și fizicienii poartă răspunderea pentru aceste evenimente ?

Desigur că motivele acelor care au participat la fabricarea explozivelor atomice erau cu totul ireproșabile. Mulți au efectuat această muncă, pur și simplu, ca o parte a obligațiilor lor de război, alții au participat mînați de teama că germanii ar putea să o ia înainte în ce privește fabricarea bombei atomice. De asemenea, nu exista încă vreo organizație a oamenilor de știință cu ajutorul căreia să se fi putut forma o poziție comună. Fiecare în parte nu era decît un șurub în uriașa mașină condusă de oameni politici și militari. Fizicienii de frunte au devenit consilierii științifici ai acestor bărbați de stat și au gustat brusc sentimentul nou al puterii și influenței. Munca pe care o făceau le plăcea și, întrucît se bucurau de enormul succes al muncii lor, au uitat la început să se mai gîndească la consecințe. Ce-i drept, un grup de fizicieni au avertizat guvernul american cu privire la urmările aruncării bombei asupra unui oraș. Existența bombei și capacitatea ei de distrugere puteau fi puse în evidență și într-un mod mai puțin criminal, de exemplu printr-o ex-

plozie pe vârful muntelui Fuji Yama. Ei au exprimat în mod exact consecințele politice dezastruoase ale unui asemenea fapt, dar sfatul lor n-a fost ascultat.

Deosebirea de păreri dintre opinia publică americană și comportarea fizicienilor s-a manifestat cel mai clar în problema păstrării secretului. Fizicienii sînt convinși că în fizică nu există secrete. Anumite procedee tehnice pot fi ținute în secret un timp limitat, dar legile naturii sînt accesibile tuturor celor care cunosc metodele cercetării științifice.

Utilizarea energiei nucleare este un eveniment care se poate compara cu primul foc pe care l-a aprins omul preistoric. Dar nu există vreun Prometeu modern care să fi adus focul din cer, ci grupuri de oameni inteligenți, dar nu prea eroici, și nici într-un caz potriviți pentru a fi eroi epici. Mulți sînt de părere că noile descoperiri vor conduce fie la un progres uriaș, fie la o catastrofă groaznică, la paradis sau la infern pe pămînt. Eu însumi cred că pămîntul va rămîne ceea ce a fost dintotdeauna, amestec de cer și iad, cîmp de luptă între îngeri și draci.

Există numeroase posibilități de folosire pașnică a fisiunii nucleare. Deoarece viteza de reacție este controlabilă, ea poate fi utilizată și ca sursă de energie. Reactori pe bază de uraniu funcționează de acum în mai multe țări, și proiectarea lor continuă într-un număr din ce în ce mai mare. Există și posibilitatea de a mări gradul de influențare al procesului de fisiune prin „clocire“, organizînd procesul în reactori astfel, încît un procent mai mare din nucleele existente să se transforme în izotopi fisionabili. Acest procedeu ar „extinde“ întrucîtva materia primă.

În Răsărit, ca și în Apus, se lucrează intens la zăgăzuirea procesului de fuziune a hidrogenului, pentru a-l face astfel utilizabil pentru scopuri pașnice. Dacă aceasta ar reuși, am avea o sursă de energie ideală, inepuizabilă, pentru care materia primă stă la dispoziție nelimitat.

În afară de energie, reactorii furnizează și alte produse utile, care de pe acum au dus la un progres considerabil și care promit și mai mult. În primul rînd, trebuie amintită producerea de izotopi noi în reactorii cu uraniu. Prin aceasta, cunoașterea stabilității nucleelor și a interacțiunii lor este mult îmbunătățită. Unele din aceste pro-

duse radioactive sînt folosite în medicină în scopuri diagnostice și terapeutice, de exemplu ca înlocuitori ai radiului în bătălia împotriva cancerului. De mare importanță este și metoda așa-numiților izotopi marcați, care revoluționează cu adevărat chimia și biologia. Von Hevesy a avut ideea să urmărească soarta atomilor în procesele chimice și biologice prin adăugarea unor cantități mici de izotopi radioactivi. Izotopii adăugați își trădează prezența prin radiație. Și deoarece metodele de evidențiere pentru undele radioactive sînt extraordinar de sensibile, pe această cale pot fi evidențiate urme cu mult mai slabe ale unui element decît, de exemplu, prin cîntărire. Devine chiar posibil să se cerceteze distribuția atomilor în țesuturi vii. Înainte, realizarea acestei idei era limitată la un număr redus de atomi, pentru care erau cunoscuți izotopi radioactivi naturali. Astăzi însă dispunem de asemenea izotopi aproape pentru fiecare element al sistemului periodic; lucrările în această direcție au și adus în scurt timp rezultate importante și sînt de așteptat altele.

Dar ce înseamnă toate aceste importante cuceriri în comparație cu spectrul posibilității unui război atomic de mari dimensiuni, care pîndește în umbră ?

Împreună cu alte descoperiri drăcești, cum sînt rachetele teleghidate pentru aruncarea de bombe la mari distanțe și mijloace toxice, biologice și radioactive, un astfel de război va aduce o cantitate de suferință umană și de înjosire a omului care este de neînchipuit. Nici o țară n-ar fi imună la aceasta, dar cel mai mult ar avea de suferit țările cu industrie foarte dezvoltată. Este extrem de îndoielnic dacă civilizația noastră tehnică ar putea să supraviețuiască unei asemenea catastrofe. Aproape că ești dispus să nu privești acest lucru ca o mare pierdere, ci ca o pedeapsă dreaptă pentru eșecurile și viciile ei: sterilitatea în artă și literatură, neglijarea doctrinelor etice ale religiei și filozofiei, lipsa de bunăvoință în ce privește renunțarea la unele concepte politice învechite. Și totuși, sîntem cu toții încurcați în mrejele acestei tragedii, iar instinctul de conservare personală și dragostea pentru copiii noștri ne determină să căutăm o cale de salvare.

Fizica a fost adesea în situații din care nu părea să existe nici o ieșire logic consistentă. Gîndiți-vă la conflic-

tul dintre teoria corpusculară a lui Newton și teoria ondulatorie a lui Huyghens. Și totuși, contradicțiile au fost totdeauna depășite.

Lumea, care e gata să utilizeze cu dragă inimă darurile fizicii ca mijloc de distrugere în masă, ar face mai bine să studieze acele metode de gândire ale fizicii care au condus la soluționarea unor contradicții aparent de nerezolvat și la reconciliere.

*Simbol și realitate**

Incercare de a filozofa în spiritul științelor naturii
și nu o filozofie a științelor naturii

1. Introducere

Dacă astăzi cineva, care nu este nici fizician nici astronom, nici chimist, ia în mână un manual sau un tratat dintr-unul din aceste domenii, el este de obicei impresionat de abundența simbolurilor matematice, și de alt fel, și de lipsa unor descrieri ale proceselor din natură. Chiar aparaturile sînt indicate doar simbolic, prin diagrame. Asta să fie știința naturii? Unde să mai găsești natura vie în noianul de formule? Ce au de-a face simbolurile fizice și chimice cu realitatea, așa cum o știm?

Dar chiar cercetătorul naturii trebuie să-și pună el însuși întrebarea de ce căutăm să abordăm natura pe această cale abstractă, formală, cu ajutorul simbolurilor. Este larg răspîndită opinia că ele servesc doar comoditatea, reprezentînd un fel de stenografie fără de care nu s-ar putea cuprinde și stăpîni abundența materialului. În cele ce urmează aș vrea să arăt că problema e mult mai adîncă. Simbolurile sînt un mijloc esențial pentru a pătrunde în realitatea ascunsă în dosul fenomenelor.

2. Realismul naiv

Pentru omul simplu și necultivat, realitatea este ceea ce simte și percepe el. Realitatea acelor obiecte care îl în-

* Comunicare prezentată la Conferința laureaților „Premiului Nobel” în chimie, ținută la Lindau/Bodensee, între 21 și 26 iunie 1964. (Autorul a înlocuit printr-o altă introducere pe cea destinată chimiștilor).

conjură este pentru el indiscutabilă, tot atît de indiscutabilă ca aceea a durerilor, bucuriilor și speranțelor sale. I se arată poate unele iluzii optice care îl pun în gardă asupra faptului că uneori percepția conduce la judecăți discutabile sau învederat false cu privire la ceea ce are loc în realitate. Dar aceasta rămîne totuși întotdeauna la marginea conștiinței, ca o excepție caraghioasă și ciudată.

Poziția respectivă se numește realism naiv. Marea majoritate a oamenilor rămîne la ea, chiar dacă învață să distingă experiența subiectivă — ca bucuria, durerea, așteptarea, decepția — de cea obiectivă, care are de-a face cu lucrurile din lumea exterioară.

Unora însă li se întîmplă cîte ceva care-i fac sceptici și îi impresionează mai profund. În cazul meu, așa a fost.

Aveam un văr mai mare, care era deja student pe cînd eu îmi toceam încă coatele pe băncile școlii. În afară de cursurile de specialitate, de chimie, el audia și un curs de filozofie, care îl impresiona mult. Odată, m-a întrebă pe neașteptate: „De fapt, ce ai în vedere cînd spui că frunza asta este verde, iar cerul de colo e albastru?” Întrebarea mi s-a părut de-a dreptul inutilă. Am răspuns: „Am în vedere tocmai că e verde sau albastru, fiindcă așa le văd, după cum le vezi și tu”. Dar el nu s-a mulțumit cu atît și m-a întrebă în continuare: „De unde ști că eu văd verdele exact ca tine?” Nici răspunsul meu, „doar toți oamenii văd așa”, nu l-a satisfăcut. „Există doar acromatopsici care văd culorile altfel, de exemplu nu pot distinge roșul de verde”. Așa m-a încolțit și m-a lămurit că nu există nici un mijloc pentru a stabili cu precizie ce percepe un altul și că însăși afirmația că el ar percepe același lucru ca și mine nu are sens.

Așa am înțeles că totul este în fond subiectiv, totul, fără excepție. Și asta a fost pentru mine un șoc.

Problema nu era de a distinge subiectivul de obiectiv, ci de a concepe cum de putem ajunge la afirmații obiective, eliberîndu-ne de ceea ce este subiectiv. Anticipez de pe acum că la nici un filozof nu am găsit vreun răspuns care să mă satisfacă, ci doar prin preocupările mele din domeniul fizicii și domeniile conexe am ajuns, spre sfîrșitul vieții mele, la un răspuns care mi se pare oarecum acceptabil.

Pe vremea cînd eram încă adolescent am ascultat îndemnul vărului și mentorului meu de a-l citi pe Kant. Mai tîrziu, am aflat că problema modalității de transformare a percepțiilor senzoriale ale fiecăruia în parte în cunoaștere obiectivă și problema semnificației cunoașterii respective sînt cu mult mai vechi, că de exemplu, doctrina lui Platon asupra ideilor ține de acest domeniu, după cum și numeroasele speculații ale filozofilor următori, din antichitate și evul mediu, pînă la predecesorii imediați ai lui Kant, empiriștii englezi Locke, Berkeley și Hume. Nu vreau însă să vorbesc despre istoria filozofiei, ci să spun doar cîteva cuvinte despre Kant, fiindcă ideile sale au rămas influente pînă în prezent și fiindcă vreau să folosesc terminologia sa.

Citez din *Critica Rațiunii Pure* („Teoria transcendentă elementară”, partea întîi, „Estetica transcendentă”) : „Prin intermediul senzorialității... ni se dau obiectele, și numai ele ne furnizează intuițiile ; intelectul însă le gîndește, și din el provin conceptele”. Așadar, Kant consideră că obiectele intuiției sînt prelucrate de intelect în concepte ; pentru el, este de la sine înțeles că obiectele intuiției sînt aceleași pentru toți subiecții și că conceptele intelectului se formează la fel la toți subiecții.

După Kant, întreaga cunoaștere se referă la cele ce apar, la fenomene, dar ea nu este determinată exclusiv de experiență (a posteriori), ci și de structura rațiunii noastre (a priori). Formele a priori ale intuiției noastre sînt spațiul și timpul, formele a priori ale gîndirii se numesc categorii ; el dă o listă de asemenea categorii, printre care se află, de exemplu, cauzalitatea.

Problema dacă în spatele lumii aparențelor (*phaenomena*) există o alta, lumea existentă în sine (*noumena*), este, după părerea mea, lăsată deschisă de Kant. Despre „lucrul în sine” el vorbește ca fiind incognoscibil. Citez aici un pasaj din cartea lui Bertrand Russell, *Wisdom of the West* (MacDonald, London, 1957). La pagina 241 el spune (în traducerea mea) :

„După teoria lui Kant, este imposibil să cunoaștem prin experiment un *lucru în sine*, căci orice experiment

are loc în spațiu și timp, și în conformitate cu categoriile. Putem conchide cel mult că asemenea obiecte există, dacă — în prealabil — acceptăm o sursă externă a percepțiilor. Riguros vorbind însă, nici aceasta nu este permis, deoarece nu avem vreun mijloc independent pentru a stabili că asemenea surse există și chiar dacă le-am avea, tot n-am putea spune că tocmai ele au cauzat percepțiile. Fiindcă, dacă vorbim de *cauzare*, ne situăm deja în interiorul plasei conceptelor a priori care sînt valabile numai în interiorul lumii empirice“.

Conceptul vag de „lucru în sine“ este considerat în general ca fiind punctul slab al doctrinei lui Kant. El este evident necesar pentru a putea în general înțelege cum de este posibil ca percepția senzorială, și prelucrarea ei conceptuală, trăite, respectiv efectuate de fiecare subiect în parte, să poată duce la enunțuri obiective, valabile pentru toți subiecții. Dar această condiție preliminară a oricărei cunoașteri obiective ar fi, la rîndul ei, incognoscibilă.

Voi încerca să arăt cum se poate ieși din această dilemă cu ajutorul metodelor de gîndire ale științelor naturii.

Înainte însă aș vrea să trec pe scurt în revistă poziția față de această problemă a sistemelor filozofice postkantiene.

4. Sistemele filozofice ulterioare

Nu mă voi ocupa de preistoria problemei felului în care subiectivul devine obiectiv; vreau numai să amintesc că ea este schițată încă în cunoscuta alegorie a lui Platon despre umbra din grotă și că joacă un rol la filozofii de mai târziu, în special la scepticul David Hume. Filozofii postkantieni au soluționat-o în moduri diferite.

Există sisteme filozofice care în general admit numai lumea fiecărui subiect în parte, a lui *ipse*. În tinerețea mea circula o carte a lui Stirner, *Der Einzige und sein Eigentum* (Unicul și lumea lui), care după cum arată titlul, susținea acest punct de vedere al așa-zisului solipsism. Din faptul că am reținut titlul, trebuie să deduc că pe atunci m-a impresionat.

Mult mai răspîndită este opinia, pe care evident o împărtășea și Kant, că e de la sine înțeles că nu trebuie demonstrat faptul că percepțiile senzoriale ale diferiților indivizi concordă și că singura problemă care se pune este de a cerceta această lume comună a aparențelor. Aici se încadrează sistemele zise „idealiste“, care au culminat cu Hegel, precum și altele, printre care *fenomenologia* lui Husserl, ale cărui prelegeri am mai apucat să le audiez la Göttingen. El a afirmat că se poate ajunge la cunoaștere printr-un proces spiritual denumit „perspectivă esențială“ (*Wesensschau*). Dar mie aceasta nu-mi spunea nimic.

Școala, atît de răspîndită astăzi, a pozitivismului logic, care pornește de la fizicianul filozof Ernst Mach, este mai puțin absconsă, dar și mai radicală. Pentru ea, sînt reale doar impresiile senzoriale nemijlocite, tot restul, întreaga lume a conceptelor, a vieții de toate zilele, precum și cea a științei există numai pentru a stabili o conexiune logică între impresiile senzoriale. Filozoful american Margenau a introdus pentru aceasta cuvîntul *constructs* (construcție nu este o traducere cu totul exactă). În concepția cea mai extremă, aceasta duce spre negarea existenței unei lumi exterioare sau, cel puțin, la susținerea incognoscibilității ei. În viața practică, desigur că nici un partizan al acestei doctrine nu se va comporta ca și cum n-ar exista o lume exterioară. În spatele tuturor acestor teorii se află mereu aceeași ipoteză că lumea impresiilor senzoriale este „aceeași“ pentru diverși subiecți. Dar ce înseamnă aceasta, rămîne firește o problemă deschisă.

Materialismul statelor comuniste din Răsărit cuprinde toate aceste teorii sub denumirea de „idealiste“ și le combate în modul cel mai aspru. El afirmă, firește, de asemenea, fără demonstrație, ca axiomă existența unei realități independente de subiect.

Dar ce cred fizicienii sau, în general, cercetătorii naturii cu privire la problema realității ?

Mi se pare că majoritatea sînt realiști naivi, care nu prea vor să-și bată capul cu subtilități filozofice. Le este suficient să observe fenomenele, să le măsoare și să le descrie în jargonul lor specific. Atîta timp cît au de-a face cu instrumentele și instalațiile experimentale, ei utilizează

limba obișnuită, completată cu expresii de specialitate, așa cum este uzual în fiecare meserie.

Dar de îndată ce trec la teoretizare, adică la interpretarea observațiilor situația se schimbă. Încă în mecanica lui Newton, prima teorie fizică în sens modern, apar concepte care nu corespund unor lucruri obișnuite, de exemplu forța, acțiunea la distanță, masa, energia. Pe măsura înaintării cercetărilor, lucrurile s-au conturat în acest sens. În teoria lui Maxwell a electromagnetismului a apărut conceptul de câmp, care se află cu totul în afara lumii obiectelor perceptibile. Legile cantitative exprimate în formule matematice, ca ecuațiile lui Maxwell, au prevalat din ce în ce mai mult. În teoria relativității, în fizica atomică, în chimia modernă, procesul respectiv a devenit tot mai clar, pînă ce, în sfîrșit, în mecanica cuantică a apărut un caz în care formalismul matematic se prezenta aproape complet și încununat cu succes înainte de a fi reușit o interpretare cu ajutorul cuvintelor, care nici pînă astăzi nu este definitiv stabilită.

Ce se întîmplă aici? În fizică, formulele matematice nu sînt un scop în sine, ca în matematica pură, ci simboluri pentru un fel de realitate, care se află dincolo de stratul de experiență a vieții cotidiene. Eu afirm că acest fapt este în cea mai strînsă legătură cu întrebarea cum de este posibilă transformarea impresiilor subiective în cunoaștere obiectivă.

5. Metodele de gîndire ale fizicii

Vreau să încerc abordarea acestei probleme filozofice cu metodele de gîndire ale fizicienilor. Acestea au fost în cea mai mică măsură preluate din sisteme filozofice. Ele s-au format tocmai pentru că gîndirea tradițională a filozofilor a dat greș în practica fizicii moderne. Forța lor rezidă în aceea că s-au confirmat. Prin aceasta, nu vreau să spun numai că ele au contribuit la înțelegerea proceselor, că le-au limpezit, ci și că au condus la descoperirea unor fenomene noi, adesea de o impresie copleșitoare, și la dominația asupra naturii.

Dar ceea ce propun nu este însă un empirism căruia filozofii metafizicieni îi acordă cu plăcere epitetul de

„plat“. Legile gîndirii, cu care lucrează fizicienii, nu sînt extrase din experiență, ci sînt idei, descoperiri ale unor mari gînditori. Dar ele sînt verificate prin experiență și anume, printr-o experiență de amploare uriașă. Așadar, nu am de gînd să fac o filozofie a științelor naturii, ci o filozofie în spiritul științelor naturii. Îmi este limpede că metafizicienii mi-o vor lua în nume de rău. Dar trebuie să înghit și asta.

În primul rînd, vreau să enumăr unele legi ale gîndirii și să descriu originile și realizările lor :

a. *Decidabilitate*

Primul principiu al gîndirii științifice spune : nu utiliza nici un concept pentru care în principiu nu se poate decide dacă se potrivește sau nu, în fiecare caz în parte.

Cînd electrodinamica și optica corpurilor în mișcare au întîmpinat dificultăți ce păreau de neînvins, Einstein s-a gîndit că toate aceste dificultăți pot fi atribuite presupunerii după care conceptul de simultaneitate a unor evenimente în locuri diferite ar avea un sens absolut. El a arătat că nu este așa, deoarece viteza luminii folosită pentru semnalizare are un caracter finit și că cu mijloacele din domeniul fizicii se poate defini numai simultaneitatea relativă la un anumit sistem de referință. De aici provine teoria relativității. Ea a condus la o nouă doctrină asupra spațiului și timpului. Afirmatia lui Kant că spațiul și timpul ar face parte dintre formele apriorice valabile ale intuiției a fost astfel refutată în mod definitiv. Drumul a fost pregătit prin descoperirea geometriilor neeuclidiene (Gauss, Bolyai, Lobacevski), care a urmat curînd după Kant. Dacă geometria tradițională a lui Euclid nu este unica posibilă din punct de vedere logic, înseamnă că ea nu este valabilă a priori și deci poate fi examinată experimental. Gauss a tras această concluzie îndrăzneță și a făcut măsurători ale sumei unghiurilor în triunghiul determinat de cei trei munți din Germania centrală : Brocken, Inselsberg și Hoher Hagen. El nu a găsit nici o diferență față de două unghiuri drepte, după cum susține Euclid. Succesorul său, Riemann, a dezvoltat mai departe ideea că geometria este o parte a științei empirice și a dat o generalizare măreață, în cadrul căreia

se introduce și se aplică cu toată rigoarea ideea de spațiu curb.

În teoria gravitațională a lui Einstein, care în mod uzual e denumită teoria „relativității generale”, principiul decidabilității a fost aplicat din nou. El a pornit de la faptul experimental cert că într-un câmp gravitațional toate corpurile capătă aceeași accelerație, independent de masa lor. Un observator închis într-o ladă nu poate deci decide dacă accelerația relativ la ladă a unui corp situat în ladă provine de la un câmp gravitațional sau de la accelerația întregii lăzi în direcție opusă. Din acest simplu considerent a rezultat impunătorul edificiu al teoriei relativității generale. Iar instrumentul matematic esențial a fost aici geometria riemanniană, pe care am amintit-o mai sus, aplicată la „lumea” cvadridimensională, compusă din spațiu și timp.

Am redat toate cele de mai sus numai pentru a arăta cât de fructuos a fost în fizică principiul decidabilității.

Un al doilea exemplu, în care principiul a dat roade și mai bogate, este mecanica cuantică. După un început rodnic, teoria lui Bohr a mișcărilor electronice în atom a întâmpinat dificultăți. Heisenberg le-a înlăturat prin observația că teoria lucra cu mărimi principial neobservabile (orbite electronice, cu dimensiuni și perioade de revoluție determinate); el a schițat o nouă teorie, care se sprijinea numai pe concepte a căror valabilitate putea fi empiric decisă. Mecanica nouă, la a cărei elaborare am colaborat și eu, a făcut să cadă încă una dintre categoriile a priori ale lui Kant: cauzalitatea. În fizica clasică, aceasta a fost interpretată întotdeauna (chiar și la Kant) în sens determinist. Mecanica nouă nu este deterministă, ci statistică (la aceasta am să mai revin). Succesul ei în toate domeniile fizicii este indubitabil.

Mi se pare rezonabil să aplicăm principiul decidabilității și la problema filozofică a elaborării unui tablou obiectiv al lumii pe baza percepțiilor subiective.

b. *Compatibilitate, simboluri*

Considerațiile noastre au pornit de la întrebarea sceptică: cum de este posibil de a conchide asupra existenței unei lumi exterioare obiective pe baza lumii empirice

subiective ? Or, această concluzie este înăscută, și atât de naturală, încît orice dubiu în privința sa are în sine ceva absurd.

Imposibilitatea de a decide dacă verdele pe care îl văd eu este același verde pe care îl vezi tu, decurge din aceea că se încearcă un acord relativ la o senzație unică. Ceea ce este într-adevăr imposibil. Dar de îndată ce avem de-a face cu două senzații ale aceluiași organ de simț, de exemplu două culori, au loc enunțuri comunicabile, decidabile, verificabile obiectiv, care se bazează pe comparații fiind înainte de toate, judecați despre egalitate și inegalitate (ar trebui să spunem mai bine indescernabilitate și discernabilitate ; dar să nu mai intrăm în asemenea subtilități psihologice). În această privință, doi subiecți se pot fără îndoială înțelege. Deși eu nu pot să spun altuia ce resimt cînd afirm că ceva este verde, totuși pot să stabilesc — și el de asemenea — că atunci cînd verdele a două frunze mi se pare identic și lui i se pare identic.

În afară de „egalitatea“ perechilor, există și alte relații de comparație, care sînt comunicabile și obiective. În primul rînd, cele de tipul mai mare-mai mic, de exemplu, mai luminos-mai întunecos, mai tare-mai încet, mai cald-mai rece, mai dur-mai moale etc. Dar nu este necesar să examinăm amănunțit toate aceste posibilități. Avem nevoie numai de existența unor însușiri-perechi comunicabile.

În fizică, acest principiu al obiectivării este de mult cunoscut și utilizat. Culori, sunete, ba chiar și forme sînt luate în considerare, nu fiecare în parte, ci perechi. Fiecare începător învață așa-numita metodă de zero, de exemplu în optică, unde observatorul e pregătit în vederea constatării unei dispariții a deosebirii de percepere (luminozitate, nuanță de culoare etc). Citirea la un instrument de măsură cu ac indicator înseamnă că două linii, acul indicator și diviziunea de pe scală, se acoperă, adică pozițiile lor nu mai sînt discernabile. Cea mai mare parte a fizicii experimentale se bazează pe asemenea citiri de indicații de pe scale.

Faptul că atunci cînd comparăm perechile devin posibile propoziții comunicabile, adică independente de subiect, obiective, are o importanță excepțională, pentru că pe acest fapt se întemeiază vorbirea și scrierea, precum și

uriaşul aparat de gîndire al matematicii. Toate aceste mijloace de înţelegere între subiecţi eu aş vrea să le numesc simboluri.

Ele sînt impresii vizuale şi auditive reproductibile cu uşurinţă şi la care nu contează forma exactă şi amănuntele, ci numai alura. Cînd eu scriu sau pronunţ *A*, iar altul scrie sau pronunţă de asemenea un *A*, atunci fiecare din noi percepe atît *A*-ul propriu cît şi *A*-ul străin ca fiind acelaşi, atît acustic, cît şi optic. Aici contează numai o anumită concordanţă grosolană — matematicianul ar spune : topologică — şi nu o concordanţă a amănuntelor (cum sînt înălţimile de ton la vorbire, respectiv caracterele de mîna sau de tipar la scriere).

Simbolurile sînt purtătorii înţelegerii între subiecţi şi sînt decisive pentru posibilitatea cunoaşterii obiective.

c. *Correspondenţă, asociaţie*

Goethe spune undeva în *Maximele şi reflecţiile* sale : „Există ceva logic necunoscut în obiect, care corespunde legităţii necunoscute în subiect“.

Citez această propoziţie nu numai pentru că ea se referă la opoziţia de care ne ocupăm dintre subiect şi obiect, ci din cauza cuvîntului „corespunde“. Cu marea sa capacitate de intuiţie, Goethe a folosit aici un concept care poate fi numit protoconcept a tot ce este învăţare, înţelegere, cunoaştere — conceptul de „a corespunde“. Cînd spun „protoconcept“ folosesc prefixul „proto“¹ cu totul în spiritul lui Goethe ; gîndiţi-vă la „protoplanta“ din teoria sa, a metamorfozelor, sau la „protofenomenul“ optic din teoria sa a culorilor. În loc de „a corespunde“, se foloseşte adesea cuvîntul de „a asocia“, care denotă operaţia a cărei rezultat este „correspondenţa“.

Copilul învaţă să vorbească ; asta înseamnă că el învaţă să asocieze cuvinte şi propoziţii la obiecte, persoane, acţiuni şi senzaţii. A scrie înseamnă a asocia semne grafice la asemenea lucruri sau la cuvinte corespunzătoare. A număra înseamnă a asocia numeralele 1, 2, 3...“, învăţate pe dinafară, la şirul de lucruri de acelaşi fel. Mate-

¹ În original, în locul lui *proto* e folosită silaba germană : *ur* ; *Urbegriff* — N.T.

matica modernă a extins acest principiu la mulțimile infinite, în cadrul așa-numitei „teorii a mulțimilor”. Întemeietorul ei, Cantor, a arătat de exemplu că nu se poate organiza o asociere reciprocă, sau cum se mai spune, „biunivocă”, între punctele unui segment și totalitatea numerelor întregi (1, 2, 3... ș.a.m.d.), așadar că și la mulțimile infinite există diferite „mărimi” (matematicienii preferă să spună „puteri”).

În geometrie, punctelor din spațiu li se asociază triplete de numere denumite coordonate; atunci, fiecărui fapt geometric îi corespunde unul în domeniul numerelor. Dar esențialul în matematică nu sînt numerele, ci este ideea de corespondență. Există în matematică domenii ample și fundamentale, cum ar fi teoria grupurilor, în care numerele joacă doar un rol nesemnificativ (în exemple) ¹.

În fizică, chiar prima descoperire, propriu-zisă de domeniul fizicii, este un exemplu bun: este vorba de faptul stabilit de Pitagora că intervalele naturale de ton, octava, cvinta, cvarta etc. corespund cu diviziunile unei corzi vibrante în conformitate cu raporturi între numere întregi 2 : 1, 3 : 2, 4 : 3 etc. Aici se stabilește o dublă corespondență între senzațiile auditive (intervalele de ton), senzațiile vizuale sau tactile (lungimi ale corzii) și numere.

Măsurarea unui grad de temperatură cu ajutorul termometrului reprezintă corespondența dintre o senzație de căldură și o anumită mărime geometrică (lungimea unei coloane de mercur, poziția unui indicator al galvanometru-lui), și prin aceasta iarăși un număr (o valoare scalară).

¹ Aș vrea să observ aici că reprezentările curente cu privire la natura matematicii sînt cu totul greșite. De exemplu, se spune adesea că întreaga matematică ar fi o tautologie, adică ceva de la sine înțeles. Această opinie o susține, de exemplu, cunoscutul biolog, laureat al Premiului Nobel, P. B. Medawar, în cartea sa *The Uniqueness of the Individual*, p. 15 (Methuen & Co., London). În realitate, matematica începe abia acolo unde intervin și se demonstrează enunțuri referitoare la mulțimi infinite. Astfel, $1+2+3+4=10$ nu este o propoziție matematică, ci una banală, verificabilă prin numărare. Dar

$$1+2+3+\dots+n = \frac{(n+1)}{2} \quad \text{pentru toate valorile lui } n = 1, 2, \dots \text{ (fără}$$

sfîrșit) este o propoziție matematică care, de altfel, se demonstrează ușor, dar numai cu ajutorul unui principiu care depășește logica uzuală (așa-numitul principiu al inducției complete).

Chimia asociază substanțelor combinațiile simbolurilor care sînt prescurtări ale numelui unui număr de substanțe fundamentale (elemente). Istoriceste, lucrul se explică prin aceea că asocierea greutăților atomice la elemente permite citirea din simboluri a greutăților moleculare ale combinațiilor ; în plus, prin asocierea de valențe ale simbolurilor atomice se pot citi și posibilitățile de reacție. Ulterior, această doctrină a legăturilor chimice s-a dizolvat în teoria generală a atomilor.

d. *Structuri*

În fiecare domeniu empiric are loc o corespondență între simboluri și percepții. În viața cotidiană, lucrurile se opresc aici ; învățăm denumirile și semnele grafice pentru impresiile, senzațiile percepute, pe care în spiritul realismului naiv nu le mai analizăm. Așa ia naștere lumea obișnuită a omului normal și imaginea ei în literatură.

Știința face un pas mai departe. Nu știu dacă ceea ce spun acum este valabil pentru toate științele, inclusiv științele culturii și ale spiritului. Prefer să vorbesc numai despre științele exacte ale naturii, pentru că le cunosc mai bine. Aici se folosesc simboluri matematice. Iar acestea reprezintă o caracteristică specifică : ele posedă structuri.

Matematica nu este decît cercetarea structurilor conceptuale camuflete în simbolurile matematice. Cea mai simplă figură matematică, șirul numerelor întregi 1, 2, 3..., constă din simboluri cu care se operează, după anumite reguli, axiomele aritmeticii ; cea mai importantă din acestea este o corespondență : pentru fiecare număr există unul următor. Prin aceasta se stabilește o mulțime de necuprins de legi de structură ; gîndiți-vă doar la numerele prime și distribuția lor specifică, la teoreme de reciprocitate a restului pătratic ș.a.m.d. Geometria are de-a face cu structuri spațiale, care analitic apar ca invariante ai unor transformări ; teoria grupurilor lucrează cu structuri care apar în succesiunea unor operații, de exemplu în permutări ale șirurilor de litere sau operații de simetrie, cum ar fi rotațiile, oglindirile și altele.

Toate acestea sînt structuri conceptuale. Fizica teoretică desăvîrșește trecerea la realitatea prin aceea că asociază simboluri matematice fenomenelor observate. Ori de cîte ori

este posibil, li se asociază astfel și fenomenelor o structură care este ascunsă în ele, și aceasta este ceea ce înțelege fizicianul prin realitatea care se află în spatele aparențelor.

Este imposibil să descriu pe scurt acest procedeu în întreaga sa varietate. Vreau să relev aici numai un punct de vedere istoric. De la Newton încoace se obișnuia să se folosească structurile conținute în ecuațiile diferențiale.

În adevăr, acestea permit o conectare imediată la experiențele cu ajutorul lucrurilor concrete din viața de toate zilele. Mecanica lui Galilei a pornit de la asemenea experiențe. Newton a generalizat conceptele mecanicii astfel, încât ele să poată fi aplicate la corpurile cerești. Primele teorii optice au utilizat de asemenea modele mecanice. Spațiul vid a fost gândit ca fiind ocupat de eterul de lumină, care funcționa după legi mecanice. Chiar Maxwell a descoperit și a explicat ecuațiile sale de câmp la început cu ajutorul unor mecanisme ascunse. Tot astfel, în atomistică la început s-au folosit modele; în teoria cinetică a gazelor atomii erau considerați ca fiind niște mici sfere elastice, care ricoșează atunci când se ciocnesc de pereții vasului sau între ei.

Opinia că modelele intuitive nu sînt necesare, ba chiar dăunează progresului, și-a croit drum foarte încet și cu foarte multă rezistență.

Ca prim exemplu, trebuie amintită refundarea teoriei lui Maxwell a câmpului electromagnetic de către Heinrich Hertz. El nu poate fi, desigur, considerat ca un teoretician extremist, căci tocmai lui îi datorăm confirmarea experimentală a teoriei, prin descoperirea undelor electromagnetice. El a conceput însă câmpul electromagnetic ca o entitate care poate și trebuie să fie descrisă în sine, fără a recurge la modele mecanice.

De atunci, evoluția a înaintat irezistibil în această direcție. Acum, un fenomen al naturii nu mai trebuie redus la un model intuitiv și ușor de înțeles din punct de vedere mecanic, ci are propria sa structură matematică, abstrasă direct din practică.

Această schimbare a devenit decisivă când, în 1900, cercetînd radiația termică, Planck a descoperit o nouă constantă a naturii, cuanta de acțiune. Aceasta nu-și găsea locul în nici un fel în sistemul mecanicii lui Newton și în

teoriile fizice edificate după modelul ei. Deși Niels Bohr a mai schițat modele ale mișcării electronilor în atomi, care semănau cu felul cum a conceput Newton mișcarea planetelor. Dar din acestea s-au selecționat anumite „stări staționare” prin „reguli cuantice” cu totul nemecanice, iar trecerile de la o stare la alta, salturile cuantice, ascultau, după părerea lui Bohr, de cu totul alte legități, fără nici un analog în practica cotidiană. Cînd această dezvoltare și-a găsit apoi încununarea în 1926 prin stabilirea mecanicii cuantice și a mecanicii ondulatorii, s-a terminat cu modelele mecanicii (și, în treacăt fie spus și cu cauzalitatea în sensul fizicii clasice).

De atunci, cercetarea a cîștigat libertatea de care are nevoie pentru a domina mulțimea mereu crescîndă a observațiilor și măsurătorilor. Se caută o matematică convenabilă domeniului experimental respectiv, se stabilesc legile ei de structură, iar acestea sînt considerate ca realitate fizică, indiferent dacă seamănă sau nu cu ceea ce este obișnuit. Astfel a apărut spațiul curbat al macrocosmului și de asemenea au apărut atomii, nucleeele, particulele elementare ale microcosmului, cu proprietățile lor specifice, care nu prea au comun nimic cu materia evidentă. Fizica trebuie să obțină încă o libertate în plus înainte de a putea ridica pretenția ca structurile stabilite să fie cu drept cuvînt denumite imagine a realității care se află în spatele aparențelor.

e. Probabilitate

Filozofia a avut întotdeauna (și mai are și acum) tendința de a stabili aserțiuni definitive și categorice. Aceasta a influențat mult și științele naturii. Fizicienii de odinioară vedeau în determinismul mecanicii lui Newton un avantaj remarcabil.

Dar, încă în secolul în care Newton a murit, apare în fizică conceptul de probabilitate. În cadrul încercărilor de a întemeia o teorie moleculară a gazelor, unele mărimi observabile, cum ar fi presiunea, au fost concepute ca valori medii pe mulțimea moleculelor. În secolul al XIX-lea, din aceste începuturi primitive s-a dezvoltat teoria cinetică a gazelor, iar apoi mecanica statistică, care se referă la toate corpurile, gazoase, lichide și solide. Aici

se referă la toate corpurile, gazoase, lichide și solide. Aici conceptul de probabilitate este aplicat și introdus sistematic în sistemul fizicii. La început, s-a presupus că astfel se ascunde doar o neputință a omului și că de fapt procesele elementare, ca de exemplu, ciocnirile dintre atomi, au loc după legi clasice, deterministe ¹.

După descoperirea mecanicii cuantice, nici aceasta n-a mai fost adevărat. Procesele elementare nu decurg în mod determinist, ci conform legilor probabilistice specifice ale teoriei cuantelor.

Cred că asemenea idei ca valabilitatea absolută, exactitatea absolută, adevăr definitiv ș.a.m.d. sînt himere care nu trebuie admise în nici o știință.

Dintr-o cunoaștere, totdeauna limitată, a unei situații din prezent, se pot trage ipoteze și presupuneri referitoare la situația din viitor, iar acestea se exprimă prin probabilități. Fiecare aserțiune probabilistică este, din punctul de vedere al teoriei de bază, adevărată sau falsă ².

Clătinarea respectivă a gîndirii mi se pare a fi cea mai mare binefacere pe care ne-a adus-o știința de astăzi. Căci credința într-un adevăr unic și în faptul că ești posesorul său este rădăcina cea mai adîncă a întregului rău de pe lume.

6. Aplicație la problema lumii exterioare

Înainte de a face ultimul pas al acestor considerente, aș vrea să amintesc din nou că am pornit de la șocul pe care îl suferă orice om care gîndește cînd își dă seama că impresia senzorială a fiecăruia în parte nu este comunicabilă, ci pur subiectivă. Cine n-a trecut printr-o asemenea

¹ Interpretarea deterministă a mecanicii lui Newton, după cum am arătat, Brillouin și cu mine, în mod independent unul de celălalt, are și o idealizare nejustificată. Ea se întemeiază pe ipoteza unor măsurători absolut exacte, ceea ce din punct de vedere fizic este evident un nonsens. Mecanica clasică poate fi adusă ușor la o formă statistică.

² Aceasta corespunde legii logice a „terțului exclus”. S-a cercetat, mai ales în legătură cu mecanica cuantică, dacă nu cumva există o logică „trivalentă”, unde între adevăr și fals mai apare posibilitatea de „nedeterminat”. Dar aici nu pot să mă ocup de aceste chestiuni.

situație va considera tot ce urmează ca o subtilitate filozofică. Într-un anumit sens, va avea dreptate. Căci realismul naiv este o atitudine naturală, care corespunde situației biologice a omului, ca și a celorlalte animale. Albinele recunosc florile după culoare sau miros, fără a filozofa despre aceasta. Câtă vreme se iau în considerare lucrurile cotidianului, problema obiectivității este un produs artificial al speculației filozofice. Dar în științele naturii lucrurile stau altfel. Aici ne ciocnim de fenomene care se află dincolo de experiența cotidiană curentă. Ceea ce se vede la microscop, în cazul unei măririi puternice, ceea ce ne dezvăluie telescopul, spectroscopul și diferite aparate de mărire ale electronicii nu se poate înțelege fără teorie, ci necesită o interpretare. În mic ca și în mare, la atomi ca și la stele, ne lovim de relații care nu se încadrează în tabloul obișnuit al mediului nostru ambiant și nu se lasă descrise decât prin concepte abstracte.

Aici nu poate fi ocolită problema dacă este vorba sau nu de o lume obiectivă, existentă independent de observator.

Nu cred că pe cale logică se poate obține un răspuns categoric. Dar acest lucru este posibil îndată ce facem uz de libertatea de a considera drept falsă o aserțiune foarte improbabilă.

Ipoteza că concordanța structurilor, care sînt recepționate de diferite organe senzoriale și sînt comunicabile de la individ la individ, s-ar baza pe întîmplare este în cel mai înalt grad improbabilă.

Acesta este raționamentul normal al cercetătorului din domeniul științelor naturii, ba mai mult, al oricărui cercetător al faptelor. Un arheolog, de exemplu, dacă găsește cioburi identice de vase în două țări diferite conchide că aceasta nu poate fi o întîmplare, ci că indică o origine comună.

Nu mă sfiesc să identific astfel de structuri care se pot stabili obiectiv cu „lucrul în sine“, al lui Kant. Obiecțiile împotriva acestui concept, pe care le-am citat la început, după Bertrand Russell, își pierd valabilitatea în cazul unei asemenea poziții. Ele se reduc la aceea că „lucrul în sine“ trebuie considerat drept cauză a faptului că fenomenele percepute de diverși indivizi pot fi considerate ca iden-

tice, în timp ce categoria de cauză are sens doar în domeniul fenomenelor înseși. Conceptul de cauză este o rămașiță a formelor mai vechi de gândire și este înlocuit astăzi prin procedeul corespondenței, pe care l-am descris. Acest procedeu duce la structuri care sînt comunicabile și controlabile, adică obiective. De aceea, pentru ele apare îndreptățită denumirea de „lucru în sine”. Ele sînt formă pură, lipsită de orice calitate senzorială. Cu atît trebuie și putem să ne mulțumim.

Rezultatul respectiv contrazice firește modul tradițional de a concepe „lucrul în sine” a lui Kant. Hegel, de exemplu, spune în *Enzyklopädie der Philosophischen Wissenschaften*, paragraful 44 : „Lucrul în sine... exprimă obiectul, întrucît se face abstracție de tot ce este pentru el conștiință, de orice determinatii ale simțirii ca și de orice gânduri determinate cu privire la el. Este ușor de văzut ce mai rămîne : ceea ce e cu totul abstract, golul deplin, determinat numai ca un transcendent...”.

Dacă identificăm obiectele fizicii moderne, în special ale fizicii atomice, cu „lucrurile în sine” ale lui Kant, atunci trebuie să fim de acord cu Hegel că ele sînt foarte aproape de un „cu totul abstract”. Dar nu este adevărat că ele sînt „golul deplin determinat numai ca un transcendent”. Gîndiți-vă numai cît de multe lucruri pămîntești se pot face cu ele : mașini, avioane, reactori nucleari, materii sintetice, creieri electronici și multe altele.

E adevărat că descoperirea secretelor nucleului atomic ne va duce poate în transcendent. Dar, firește că nu aceasta credea Hegel și nici nu putea s-o presimtă.

7. Revenire la intuiție

Sistemele de formule fizice nu sînt legate de intuiție. Ele nu reprezintă direct lucruri din lumea empirică, dar se întemeiază pe experiență, sînt abstrase din ea și sînt în permanență verificate pe baza ei. Instrumentele cu care lucrează fizicianul sînt totuși lucruri din lumea cotidianului, care se descriu cu ajutorul limbajului cotidian. Rezultatele furnizate de instrumente, fotografiile, șirurile nume-

rice sau curbele însemnate în mod automat sînt toate de aceeași natură. Urmele care se observă într-o cameră cu ceață sugerează o particulă care trece pe acolo în zbor. O distribuție periodică a înnegririlor unei plăci sugerează interferențe ale undelor. Dacă am renunța la asemenea interpretări atunci orice înțelegere ar fi imposibilă, iar intuiția, care stă totuși la baza cercetării, ar fi paralizată.

De aceea, fizicienii sînt nevoiți să descrie conținutul formulelor abstracte, pe cît posibil în limba obișnuită, cu ajutorul unor concepte create prin intuiție. Aici ne lovim de dificultăți de un mod deosebit, care au fost studiate mai ales de către *Școala de la Copenhaga*, sub conducerea lui Niels Bohr. Bohr a arătat că felul în care decurg procesele atomice poate fi descris cu ajutorul tradiționalelor concepte „clasice”, dacă se renunță la cuprinderea dintr-o dată a tuturor proprietăților unui sistem fizic. Sînt necesare diferite instalații experimentale, care se exclud reciproc, dar se completează una pe alta, instalații care se numesc „complementare”. Deoarece experimentatorul are posibilitatea alegerii dintre ele, se introduce astfel din nou un element subiectiv în fizică, element care nu poate fi eliminat. De asemenea, și faptul că teoria poate face numai previziuni de ordinul probabilităților, adică numai cu caracter gradual, este o pierdere în ce privește obiectivitatea. Din punctul nostru de vedere, care consideră subiectivitatea ca primară, iar posibilitatea enunțurilor obiective ca problematică, nu ne surprinde faptul că nu se mai poate realiza distincția riguroasă dintre subiect și obiect îndată ce se încearcă întregirea formalismului matematic pur cu imagini intuitive.

Principiul complementarității, al lui Bohr, trebuie să fie de asemenea considerat ca o nouă metodă de gîndire; el provine din fizică, dar poate fi aplicat în multe alte domenii. Este o nouă atenuare a gîndirii tradiționale, de la care ne putem aștepta la realizări importante. Dar aceasta depășește cu mult cadrul considerațiilor de față.

Aș vrea să amintesc că cea mai nouă ramură a cercetării din domeniul fizicii, teoria particulelor elementare, poate să fie încă ancorată în abstract. Dar ea conduce la previziuni cu totul concrete și observabile, deși despre procesele elementare înseși de-abia dacă ne putem face vreo.

reprezentare. Deocamdată, conținutul formulei universului, gîndită de Heisenberg, îmi apare ca un „lucru în sine“ abstract, fără corelat senzorial.

Unii vor observa aici că această orientare spre abstract este evident o trăsătură a timpului nostru. Doar ea apare și în artă, în primul rînd în pictura și sculptura abstractă. Dar paralela nu este cîtuși de puțin exactă. Căci pictorii moderni evită tot ce duce la asociații și interpretări intelectuale și se concentrează asupra impresiilor senzoriale și asupra sentimentelor. Pe de altă parte, fizicienii utilizează impresiile senzoriale ca material pentru construirea unei lumi sesizabilă doar pe cale intelectuală. Cuvîntul „abstract“ se referă deci în cele două cazuri la lucruri opuse.

Dar cercetătorul naturii trebuie să fie totdeauna conștient de faptul că orice experiență se întemeiază pe percepții senzoriale. Un teoretician care, din cauza formulelor abstracte, uită de fenomenele la a căror interpretare servesc ele nu este un adevărat cercetător al naturii, fizician sau chimist, și dacă din cauza cărților sale el se înstrăinează de bogăția de culori și frumusețea naturii, atunci nu pot decît să-l consider un biet nenorocit. Avem un echilibru rezonabil între experiment și teorie, între realitatea senzorială și cea intelectuală, și trebuie să fim atenți pentru a-l menține.

Trebuie de asemenea să avem grijă ca gîndirea, cu concepte abstracte din domeniul științelor naturii, să nu se propage în domenii unde n-are ce căuta. Valorile umane și etice nu se pot fundamenta astfel. Ce-i drept, Kant a încercat să edifice etica după modelul teoriei sale a categoriilor, cu ajutorul „imperativului categoric“. Dar valabilitatea acestei porunci nu poate fi decisă în mintea noastră; este ceva în care trebuie să crezi. Pe cît de ispititoare și satisfăcătoare ar fi gîndirea abstractă pentru cercetător, pe cît de utile ar fi rezultatele sale pentru edificiul material al civilizației noastre, pe atît este de periculoasă aplicarea ei la domenii unde nu are ce căuta, ca religia, etica, arta, literatura și toate științele cu privire la om.

De aceea, excursia mea în filozofie aș dori să servească nu numai pentru lămurirea fundamentelor științelor naturii, ci și ca un avertisment spre o limitare rezonabilă la domeniul respectiv.

*Speranța ca toți oamenii
să-și dea seama cât de mare
este pericolul atomic**

„Speranța“ este un cuvînt mai rar întîlnit în literatura fizică. O lucrare începe cu planificarea unui experiment sau a unei teorii pe baza unei presupuneri. Dar despre speranță nu prea e vorba.

De aceea, nu sînt obișnuit să vorbesc despre speranță și am avut de învins o anumită rezistență în ce privește participarea la acest șir de emisiuni despre „Speranțele timpului nostru“. Apoi însă, am reflectat asupra adevăratelor evenimente din timpul lungii mele cariere științifice. O amintire a rămas de nestins în memorie: decepția, ori de cîte ori ieșea altceva decît ceea ce era de așteptat. Dar decepția nu poate să apară decît acolo unde fusese speranță.

Nu există nici o cercetare care să fie cu totul ruptă de viață. Chiar cel mai rigid cercetător este în același timp om; i-ar face plăcere să aibă dreptate, să-și vadă confirmată intuiția; ar dori de asemenea să-și facă un nume, să aibă succes. Asemenea speranțe sînt impulsuri ale comportării sale în aceeași măsură ca setea de cunoaștere.

În ultimele decenii, credința în posibilitatea unei deosebiri nete între cunoașterea obiectivă și subiectul care cunoaște a fost distrusă de știință însăși.

Atît în activitatea științifică cît și în etica ei s-a produs o cotitură, care face imposibil să se mențină idealul vechi

* Conferință ținută la Radiodifuziunea sud-germană (R.F.G.) pe data de 21 februarie 1963 (publicată în culegerea „Speranțele timpului nostru“, Editura R. Piper & Co., München).

al unei cercetări pure, al cărei țel unic este cunoașterea. Generația mea s-a dedicat științei de dragul științei și credea că ea niciodată nu va putea duce la ceva rău, deoarece căutarea adevărului este în sine un bine.

A fost un vis frumos, din care ne-au trezit evenimentele vieții internaționale. Chiar și cei care dormeau cel mai adânc au fost treziți atunci când în august 1945 primele bombe atomice au căzut asupra orașelor japoneze.

De atunci ne-a devenit clar că sîntem indisolubil legați, prin rezultatele muncii noastre, cu viața, cu economia și politica, cu luptele sociale din interiorul statelor și cu lupta pentru putere dintre state, și de aceea purtăm o mare răspundere.

Aș vrea să apăr aici opinia după care bomba atomică a fost doar ultimul termen al unei lungi și previzibile evoluții, care în prezent ne împinge spre o criză din care se poate ivi o catastrofă nimicitoare și definitivă. Speranța de a o evita se poate întemeia numai pe înțelegerea drumului care ne-a adus pînă la situația de astăzi.

N-aș putea, dar nici nu sînt obligat să vorbesc despre speranță într-un mod abstract filozofic. Aș putea să vă povestesc numai despre propria mea experiență și să-mi întemeiez astfel așteptările. Aș vrea să arăt, prin anumite exemple, cum tehnica războiului a condus la desființarea treptată a barierelor etice, pînă ce s-a ajuns la situația actuală când nu mai sînt nici un fel de asemenea bariere. Pornind de la această situație, nu se mai poate înainta în aceeași direcție. Nu mai există decît o oprire și apoi poate o întoarcere. Tocmai aceasta este ceea ce putem spera.

Prima mea cunoștință despre tehnica modernă de război a provenit de la ora de istorie: de pildă, cum a putut să ajute pușca Dreyse la victoria armatei prusace în războiul din 1866 împotriva Austriei, în timp ce, cu toată superioritatea puștilor Chassepot, francezii au pierdut războiul din 1870—1871. Se pare că pe atunci superioritatea tehnică, deși juca un rol important, nu era decisivă. Totuși, a fost recunoscut pericolul și i s-a răspuns cu ideea umanizării războiului, care și-a găsit expresia în Crucea Roșie și în Convențiile de la Geneva cu privire la armele interzise, ocrotirea populației civile și altele.

În primul război mondial lucrurile s-au schimbat. A început și el în stilul vechi, cu marșuri și bătălii. În curînd însă, caracterul luptelor s-a schimbat radical. Fronturile s-au imobilizat, s-a dezvoltat războiul de poziție și încercările repetate de a ieși din tranșee cu ajutorul focului de artilerie. Soldatul devenea tot mai mult simplă carne de tun, obiect de nimicire cu ajutorul unor forțe supraomenești, pe care le furniza tehnica. Factorul decisiv era puterea industriei și capacitatea de invenție tehnică a spatelui frontului.

Eu însumi eram un mic șurub în această mașinărie și anume, membru al unei autorități militare din Berlin, unde, împreună cu alți fizicieni, mă ocupam cu așa-zisele „metode sonometrice“. Acestea serveau pentru a stabili poziția tunului inamic, măsurînd timpul de sosire al detunăturii în diferitele posturi de observație. Chiar în acest domeniu mărunț, lipsit de o mare importanță, devenea clar că totul depinde de întreaga situație industrială. Instrumentele fine de măsurat pe care le ceream pentru a face ca procedeele noastre să fie eficiente, ne-au fost refuzate de către instanțele superioare, deoarece pentru asemenea „fleacuri“ industria nu avea nici timp, nici mîină de lucru și nici materiale. În schimb, englezii nu făceau economii în acest domeniu.

Un observator care nu era zăpăcit de propaganda „patriotică“ vedea mersul războiului în felul următor: tînetul bărbătesc era jertfit într-o luptă care în realitate era decisă de tehnica pe care o pune la dispoziție spațele frontului și de rezervele sale de materii prime.

Toate acestea mi s-au părut încă de pe atunci imorale și inumane în cel mai înalt grad și am început să-mi dau seama că în războiul modern prevalează nu curajul eroic, ci tehnica, și că în societatea umană tehnica și războiul sînt incompatibile.

Permiteți-mi să amintesc două evenimente din primul război mondial care ilustrează cele de mai sus; amîndouă sînt legate de numele marelui chimist Fritz Haber. Cu puțin înainte de izbucnirea războiului, el descoperise o metodă de combinare a azotului atmosferic cu hidrogenul (ca salpetru), și astfel a creat primele îngrășăminte artificiale. După cum se știe, salpetrul intră și în componența

prafului de pușcă. Marele Stat-Major german părea că prevăzuse totul, dar n-a ținut seamă de faptul că salpetrul se importa din Chile. Acest import a fost tăiat de blocadă. Fără descoperirea lui Haber războiul ar fi fost pierdut de Germania după o jumătate de an, din cauza lipsei prafului de pușcă. Gîndirea științifică și priceperea tehnică de a o folosi au fost așadar aici factori hotărîtori ai istoriei mondiale. Haber a intervenit a doua oară pentru a pune în mișcare fronturile imobilizate; el a descoperit războiul cu gaze, utilizarea gazelor otrăvitoare (la început clorul, apoi altele mult mai periculoase) pentru alungarea inamicului din tranșee. Această metodă a avut succes la început. Dar dependența ei de vînt și de starea vremii, precum și inventarea măștilor de gaz i-au limitat eficiența, și dușmanul a putut în curînd s-o manevreze în aceeași măsură sau chiar într-o măsură mai mare.

Mulți colegi ai mei au colaborat la aceasta, printre care și oameni cu convingeri etice înalte. Ca și pentru Haber, pentru ei prima datorie era apărarea patriei. Am simțit încă de pe atunci un conflict de conștiință. Nu era vorba dacă grenadele cu gaze sînt mai inumane decît cele obișnuite, ci se punea problema dacă otrava, considerată din timpuri imemorabile ca un mijloc al asasinatului laș, poate fi admisă ca armă de război; căci fără o graniță a ceea ce este permis în curînd, totul ar deveni permis. Dăr, abia cu mult mai tîrziu, după Hiroshima, am început să-mi formeze concepte clare cu privire la problema respectivă. Altfel, conștiința responsabilității cercetătorului științific și-ar fi pus amprenta pe activitatea mea didactică și poate că nu s-ar fi găsit atît de mulți dintre elevii mei gata să colaboreze la pregătirea bombei atomice.

Că încă atunci, în primul război mondial, nu eram singur, cu îndoielile mele, mi-a arătat-o o întîmplare din anul 1933, cînd am venit ca refugiat în Anglia, la Cambridge. Am fost primit acolo cu prietenie, însă Haber, care, în ciuda marilor sale servicii sus-amintite din timpul primul război mondial, a fost de asemenea constrîns să emigreze, întîmpină rezistență. Lordul Rutherford, întemeietorul fizicii nucleare și unul din cei mai mari fizicieni ai timpului nostru, a refuzat o invitație la mine acasă

împreună cu Haber, deoarece nu voia să întindă mîna celui care a introdus războiul cu gaze.

Cu toate acestea, Rutherford contribuise mult la apărarea tehnică a patriei sale și nu era în nici un caz un pacifist. Dar el cunoștea limita dincolo de care un mijloc de distrugere nu mai putea fi considerat ca armă. Cred că el ar fi justificat aceasta prin considerentul că fără o *linie morală de demarcație* în ceea ce privește utilizarea armelor n-ar putea exista nici o graniță pentru distrugere, ceea ce ar aduce după sine pericolul sfîrșitului vieții civilizate.

Acest punct de vedere a fost justificat. Războiul cu gaze a însemnat o înfrîngere morală decisivă a omenirii. Deși în timpul celui de-al doilea război mondial gazele n-au fost folosite și deși *Convențiile de la Geneva* le-au interzis, totuși toate statele militare au creat organizații pentru studiul și punerea în aplicare a războiului toxic, a mijloacelor chimice și biologice de distrugere. Cu greu s-ar fi putut împiedica folosirea lor, dacă ele s-ar fi dovedit avantajoase din punct de vedere militar.

După aruncarea peste bord a tuturor stăvilarelor morale în ce privește războiul cu gaze otrăvitoare, a urmat prăbușirea principiului fundamental, care fusese valabil în secolul al XIX-lea, potrivit căruia statele au dreptul de a purta război numai împotriva puterii militare a inamicului, nicidecum împotriva populației civile.

Nu sînt specialist în dreptul internațional; am citit doar puțin din Grotius și din urmașii săi. Prin urmare, nu pot să vă expun istoricul acestui principiu fundamental, ci numai impresiile din evenimentele trăite de mine. Este clar că dintotdeauna populația civilă avea mult de suferit pe timp de război, în măsura în care locuia în zona operațiunilor. De asemenea, se pare că s-a considerat „permis” să se înfometeze orașele asediate și chiar țări întregi (chiar după încetarea ostilităților, cum s-a întîmplat după primul război mondial).

Limitarea ostilităților la zona operațiilor s-a prăbușit în cursul celui de-al doilea război mondial, din cauza dezvoltării aviației militare. În ce privește atacarea cu bombe a marilor orașe lipsite de apărare, Germania a luat-o înainte. Gîndiți-vă numai la Varșovia și la alte

orașe poloneze, apoi la Rotterdam, Oslo, Coventry, la bombardarea sistematică a Londrei după Dunkerque. Eram pe atunci la Edinburgh și auzeam adesea din partea colegilor și prietenilor observații pline de dispreț, în ce privește acest mod imoral de a purta războiul, pe care Anglia nu l-ar imita niciodată. Dar această presupunere s-a dovedit falsă. Cum de s-a întâmplat așa? În ce privește decizia cu privire la folosirea în război a bombelor, personalitățile principale au fost doi cercetători științifici englezi, Tizard și Lindemann. Amândoi și-au început cariera în mod asemănător; după un început strălucit în cercetare se pare că amândoi au fost cuprinși de îndoiala dacă vor putea să facă parte din rîndul corifeilor științei; și așa, s-au îndreptat spre administrație și politică.

Tizard a devenit președintele „Comisiei pentru apărarea antiaeriană” și a avut marele merit de a fi pus la timp în aplicație metoda radar pentru lupta antiaeriană, cu ajutorul căreia mica aviație militară britanică a reușit să câștige renumita „Battle of Britain” și astfel să zădărnicească planul unei debarcări germane.

Și influența lui Lindemann se baza pe merite în ce privește conducerea tehnică a războiului, dar și mai mult pe prietenia sa cu Winston Churchill. Aceasta se trăgea de la o întâmplare din timpul primului război mondial, cînd Lindemann dovedise valabilitatea unui calcul cu privire la stabilitatea unor avioane, prin aceea că a pilotat el însuși un asemenea avion și l-a salvat de la prăbușire. După această dovadă de curaj și agerime, Churchill a arătat o încredere absolută față de Lindemann, l-a făcut primul său consilier științific și a obținut înnobilarea sa ca pair sub numele de lord Cherwell.

În anul 1942, Lindemann-Cherwell a propus ca flota aeriană britanică să distrugă cartierele muncitorești din marile orașe germane. Tizard reprezenta opinia după care atacarea obiectivelor militare ar fi mult mai eficientă. Nu știu dacă la el a avut vreun rol lipsa de omenie a primului plan. Churchill l-a susținut pe prietenul său Cherwell. Mai târziu, s-a dovedit că estimațiile lui Cherwell cu privire la pagubele produse de „o mie de bombardamente aeriene” au depășit cam de șase ori prevederile, că aceste

atacuri nu au fost decisive pentru rezultatul războiului și că Tizard avusese dreptate.

Așa s-a întâmplat că orașele germane erau dărâmate și înmormântau sute de mii de civili sub dărîmăturile lor. O dată cu ele a căzut o nouă barieră morală din fața barbariei. Răul era combătut cu un rău mai mare și acesta din nou cu unul mai mare. Mă refer la așa-numitele „arme-minune“ (*Wunderwaffe*) introduse de germani. De astă dată era vorba de exterminarea neomenoasă, de la distanță, fără angajare personală, deci și fără răspundere personală, era deci vorba despre o conducere pur tehnică a războiului, despre „războiul prin apăsare pe buton“.

Un cunoscător al dreptului internațional ar putea să ilustreze această schiță a istoriei tragice a decăderii morale prin multe alte exemple, cum ar fi războiul naval după apariția submarinelor. Gîndiți-vă numai la scufundarea „Lusitaniei“, în primul război mondial.

S-a apreciat că în primul război mondial au fost ucise în total 10 000 000 de persoane, dintre care 95% soldați și 5% civili. În al doilea război mondial au fost peste 50 de milioane de morți, soldați și civili cam în egală măsură (52% față de 48%). În războiul din Coreea, unde folosirea bombei atomice abia de a fost oprită, din aproximativ 9 milioane de morți, majoritatea covârșitoare au fost civili: 84%, față de 16% soldați. Chiar și cei care încă mai cred în război ca mijloc legitim al politicii și mai țin la reprezentările tradiționale de moarte eroică pentru soție și copii, pentru apărarea patriei, ar trebui să înțeleagă că toate acestea sînt povești, și nu dintre cele frumoase.

Armele nucleare au împins această evoluție la extrem și au făcut-o vizibilă pentru oricine. Celor care pe atunci (din 1939, pînă în 1945) au lucrat în afara Germaniei la fisiunea nucleară și la aplicațiile ei tehnice și tehnico-militare nu li se poate face nici un reproș, deoarece descoperirea fisiunii uraniului provenea din „Germania hitle-ristă“ și se putea presupune că național-socialiștii vor face tot posibilul pentru a o transforma într-o armă căreia nu-i rezistă nimic. O asemenea situație trebuia prevenită.

Dar cînd prima bombă a fost gata, „Germania hitle-ristă“ se predase iar Japonia, de asemenea, își trăia ultimele ore, ba chiar ceruse pace pe cale diplomatică.

Din nou, totul a decurs după modelul disputei dintre Cherwell și Tizard. Militarii, în primul rînd generalul Groves, care era în fruntea „Administrației pentru energia nucleară“, se gîndeau numai la avantajele militare directe și calculau cîte vieți omenești se pot economisi dacă Japonia va fi constrînsă la capitulare fără o debarcare; firește, la calculul vieților omenești, japonezii n-au fost luați în considerație. De altfel, Groves nu voia nici-decum să renunțe la satisfacția de a demonstra lumii întregi realizările sale în toată amploarea lor. Fizicienilor care au contribuit în mod decisiv la această realizare el nu le-a recunoscut dreptul la cuvînt. Printre ei a existat un grup de oameni rezonabili, care în cadrul așa-numitului *Raport Franck* au prevăzut just, în perspectiva viitorului îndepărtat, consecințele aruncării bombei asupra orașelor japoneze și au pus guvernul în gardă. Decizia a luat-o un comitet organizat de către președintele Truman și în care intrau și cîțiva fizicieni proeminenți. Aceștia au acționat după modelul lui Cherwell; astfel, a fost depășită definitiv granița care ne desparte de drumul spre posibila autonimicire a speciei umane.

Ce s-a mai întîmplat după aceea trebuie amintit doar pe scurt; încercările de a ridica tehnica nucleară pe o bază internațională au eșuat. Rusia a ajuns din urmă avansul american mult mai repede decît se așteptase. Inventarea bombei cu hidrogen în America a fost foarte curînd urmată de către Uniunea Sovietică. Apoi, în rivalitatea dintre cele două mari puteri au intervenit rachetele intercontinentale, camuflate de cercetarea spațiului cosmic. În prezent, fiecare dintre marile puteri are destule arme nucleare pentru a șterge omenirea de mai multe ori de pe suprafața pămîntului.

Oamenii de stat știu ce se află în joc și încearcă să ocolească în așa fel dificultățile, încît să se păstreze echilibrul temerilor. Dar echilibrul este instabil. Oamenii devin insensibili față de pericol, căci a intervenit și se extinde o paralizie morală; politicienii devin tot mai cinici și riscă mereu ciocniri care pot da peste cap echilibrul.

Ce mai rămîne aici de sperat? În conformitate cu întrebarea ce mi-a fost pusă, putem oare spera ca intuirea

de către toți oamenii a pericolului atomic să ducă la salvare?

Singurul lucru care ne poate salva este un vechi vis al omenirii: *pace mondială* și *organizare mondială*. Ele erau considerate ca inaccesibile, ca o utopie. Se credea că omul nu-și poate schimba natura și că, deoarece întotdeauna au existat războaie, ele vor continua să existe mereu.

În prezent, nu se mai poate admite așa ceva. Într-o lume devenită mică, pacea mondială nu mai este o utopie, deoarece ea este o necesitate, o condiție de supraviețuire a speciei umane. Opinia că lucrurile stau tocmai astfel se extinde din ce în ce mai mult. Consecința nemijlocită este o paralizare a politicii, pentru că nu s-a putut încă găsi o metodă convingătoare de a obține scopuri politice fără a recurge la amenințarea cu forța, fără a recurge în ultimă instanță la război.

La aceste probleme meditează mulți oameni înțelepți și sînt convins că s-ar găsi o soluție dacă am avea la dispoziție timp suficient. Această presupunere se întemeiază pe experiența unei vieți îndelungate. Nenumărate sînt lucrurile care în tinerețea mea nu existau și erau considerate ca utopii. În știința fizicii, atomistica și electronica, care astăzi ne-au condus la o înțelegere mai adîncă a structurii materiei, făceau abia primii pași. Dacă cineva ar fi descris aplicațiile tehnice ale acestor cunoștințe, așa cum există ele în prezent, ar fi fost luat în rîs. Nu erau automobile, nici avioane, nici comunicare fără fir a știrilor, nici radio, nici cinema, nici televiziune, nici bandă rulantă, nici producție în masă și nici multe altele. Toate acestea au apărut și au provocat transformări economice și sociale în viața oamenilor, care sînt mai adînci și mai temeinice decît tot ce s-a întîmplat în istorie în cei zece mii de ani premergători: împărății semifeudale au devenit republici socialiste; labirintul triburilor de negri s-a transformat în state organizate, cu constituții moderne. A început cercetarea spațiului cosmic; astăzi nimeni nu se mai lasă surprins de planurile cele mai temerare și mai costisitoare ale cosmonauților.

Numai într-o singură problemă, care este de departe cea mai importantă: „Oare problemele litigioase cu

caracter politic, economic și ideologic nu pot fi rezolvate decât prin forță și război?" ar fi încă mereu în vigoare principiul imuabilității naturii umane: „Precum a fost din totdeauna, așa o să mai fie“.

Mi se pare absurd acest lucru, chiar dacă e susținut de mari oameni de stat și filozofi. Fără renunțarea la această axiomă omenirea este condamnată la pieire. Speranța noastră se întemeiază pe unirea a două forțe spirituale: recunoașterea morală a caracterului reprobabil al unui război degenerat pînă la asasinarea în masă a celor fără apărare și recunoașterea rațională a incompatibilității metodei tehnice de conducere a războiului, cu supraviețuirea speciei umane.

Se pune doar problema dacă avem suficient timp pentru ca recunoașterile respective să poată deveni eficiente. Căci situația actuală este în cel mai înalt grad instabilă și devine, prin propriul ei mecanism, din zi în zi mai periculoasă. Încăpățînarea unui om, defectiunea unui aparat, pasiunea oarbă a unui șef de stat, orbirea ideologică sau națională a maselor pot în fiecare moment să conducă la o catastrofă. Poate că nu vom fi cruțați și că o întîmplare înspăimîntătoare se va produce înainte de a avea loc o cotitură în gîndire și acțiune.

Dar noi trebuie să sperăm. Există două feluri de speranțe. Cînd sperî în vreme bună sau într-un cîștig la loterie, atunci speranța nu are nici o influență asupra a ceea ce se întîmplă, și dacă plouă și dacă tragi un bilet necîștigător, trebuie să te resemnezi.

Dar în problemele de conviețuire a oamenilor, îndeosebi în politică, speranța este o forță motrice. Numai dacă sperăm, acționăm pentru a apropia realizarea speranței.

Nu avem voie să obosim în a combate imoralul și iraționalul, care continuă încă să guverneze lumea. Aș vrea să citez aici cuvintele unui mare om, nu bărbat de stat sau filozof, ci un om al rațiunii practice, medicul laureat al Premiului Nobel, Gerhard Domagk, ale cărui descoperiri în chimioterapie au menținut sănătatea și viața a nenumărați oameni. Există, după cum spune el, „o profesiune de credință, o invocare, care este în același timp o punere în gardă, și totuși e plină de speranță“ și care sună astfel: „Oare ce este esențialul în această lume? Faptul că noi

oamenii ne suportăm unii pe alții, căutăm să ne înțelegem și să ne ajutăm reciproc, în măsura în care aceasta stă în puterile noastre. Pentru noi medicii acest lucru este de la sine înțeles. De ce n-ar fi posibil și pentru toți ceilalți oameni ? Să nu-mi spuneți că este o utopie ! Fiecare descoperire a fost considerată ca utopică. De ce să mai așteptăm o nouă încercare a puterilor, când avem cu adevărat destule în spatele nostru pentru a fi devenit înțelepți. Numai că este comod să ne cramponăm de obiceiuri învechite ; este mai comod să-i urmăm pe tiranii violenți, pe colerici, paranoici și alți bolnavi mintal, în loc de a medita singuri și a căuta căi noi de conciliere, în locul unei distrugerii reciproce“.

Aceste vorbe sînt clare. Ele vin din partea unui combatant pentru viață, din partea unuia care nu se limitează să *spere* salvarea oamenilor de maladii, ci pune în serviciul acestei cauze întreaga sa știință și măiestrie.

Depinde de noi, de fiecare cetățean în parte, din toate țările pămîntului, ca să se pună capăt nonsensului predominant. Astăzi, cei care ne amenință nu mai sînt bacilii de holeră sau de ciumă, ci gîndirea cinică tradițională a unor politicieni, obtuzitatea maselor și evitarea răspunderii de către fizicieni și alți oameni de știință. După cum am încercat să arăt, ceea ce au făcut oamenii de știință nu se poate anula : cunoașterea nu se poate stinge, iar tehnica are propriile ei legi. Oamenii de știință pot și trebuie însă să folosească prestigiul pe care îl au datorită cunoașterii și priceperii lor pentru a indica politicienilor drumul de reîntoarcere spre rațiune și omenie, așa cum au încercat-o o dată cei „18 din Göttingen“.

Trebuie să luptăm cu toții împotriva minciunilor și încălcărilor abuzive oficiale, împotriva afirmației că ar exista o apărare față de armele nucleare cu ajutorul adăposturilor subterane și al decretelor speciale ; trebuie să luptăm împotriva teroarei celor care îndoctrinează populația în această privință ; împotriva șovinismului, împotriva setei de glorie, de mare putere.

Mai există încă speranță, dar ea se va realiza numai dacă cu toții vom arunca în luptă totul împotriva maldiilor timpului nostru.

*Privire retrospectivă
asupra lucrărilor mele
de dinamica rețelelor cristaline**

Este o mare cinste pentru mine să deschid cu o scurtă alocuțiune acest congres de dinamica rețelelor. Dintre cărțile mele pur științifice, prima și ultima au un titlu foarte asemănător cu denumirea congresului de față. Prima carte *Dynamik der Kristallgitter* (Dinamica rețelelor cristaline), a apărut în 1915 în timpul primului război mondial (Teubner, Leipzig); a doua, pe care am scris-o împreună cu prietenul meu chinez Kun-Huang, *Dynamic Theory of Cristal Lattices* (Teoria dinamică a laticelor cristaline), a apărut în 1954 (Clarendon Press, Oxford).

Încercînd o dare de seamă asupra lucrărilor mele și ale elevilor mei în domeniul dinamicii rețelelor, trebuie să mă feresc de a mă suprapune comunicării profesorului Debye asupra preistoriei dinamicii rețelelor și toastului la banchet al profesorului Ewald, în care el vrea să vorbească despre Göttingen în jurul anului 1912, cînd tocmai apăruseră descoperirea lui Von Laue a interferențelor radiațiilor Roentgen trecute prin rețeaua cristalină și prima mea lucrare împreună cu Von Kármán asupra căldurii specifice a cristalelor. Sperasem să-l întîlnesc aici pe vechiul meu prieten Von Kármán, dar acum cîteva luni moartea mi l-a răpit. Max Von Laue, căruia teoria cristalelor îi datorează atîtea, ne-a părăsit și el de cîteva ani. Iarna trecută a murit C. G. Darwin și curînd după aceea Niels Bohr, care deși n-a lucrat personal la teoria crista-

* Cuvîntul de deschidere din 5 august 1963 la Conferința internațională „Lattice Dynamics” de la Copenhaga. Publicat în „Proceedings of the International Conference held at Copenhagen”, August 5—9, Pergamon Press Limited, Oxford, 1963.

lelor, desigur că ar fi contribuit mult la acest congres. Păstrăm amintirea acestor personalități ale științei noastre cu o întristare pătrunsă de un respect profund.

Aș vrea să vă povestesc acum cum de s-a întâmplat că am început să mă preocup de rețelele cristaline. În anul 1912 eram docent universitar la Göttingen și locuiam într-o pensiune pe Nikolausberger Weg, unde erau găzduiți mai ales studenți și tineri oameni de știință. Unul dintre aceștia era Alfred Haar, un om fermecător și amabil în cel mai înalt grad, precum și un foarte talentat matematician, originar din Ungaria; lucrările sale se mai bucură și astăzi de toată considerația. Luam prânzul împreună în camera mea. Când el a fost solicitat la catedră (cred că la Zürich), mi l-a recomandat ca tovarăș de masă pe prietenul său Theodor von Kármán, care se mutase în camera lui. Von Kármán era asistentul profesorului Prandtl, unul dintre întemeietorii hidro și aerodinamicii moderne, la care își luă în curînd doctoratul. Personalitatea sa era cu totul deosebită de cea a lui Haar; el nu era atît de amabil și fermecător, ci îi plăcea să se exprime în mod aspru, ironic, pe șleau, uneori chiar brutal. Dar era și el foarte înzestrat și atrăgător prin spiritul său. Discuțiile noastre animate, din timpul prînzurilor comune, ne-au împrietenit în curînd.

Discutam toate problemele, pe vremea aceea actuale, ale fizicii și mecanicii. Într-o zi veni la rînd lucrarea lui Einstein despre căldura molară a corpurilor solide. Am uitat cine a adus mai întîi vorba despre aceste lucruri, dar cred că a fost Von Kármán, deoarece el obișnuia să urmărească literatura din domeniul fizicii mult mai temeinic decît mine. Am stabilit îndată că formula monocromatică a lui Einstein poate fi îmbunătățită, dacă se ține seamă de compunerea oscilațiilor în rețelele cristaline; pentru a proceda rezonabil, ne-am limitat la început la cazul unidimensional. (Mai tîrziu, am aflat că acest model fusese deja tratat de către Lagrange, Laplace sau de unul dintre contemporanii lor, am uitat exact cine anume.) Apoi ne-am îndreptat spre problema tridimensională și am găsit o soluție de aproximare. După ce trimiseseam lucrarea noastră la „Physikalischen Zeitschrift“, a venit la Göttingen, din München, profesorul Sommerfeld pentru a ține o confe-

rință ; cu acest prilej, am aflat de la el că Debye a tratat aceeași problemă cu o metodă de aproximare extrem de simplă și că a făcut o comunicare în această privință în Elveția ; lucrarea lui a apărut cu puțin înainte de a noastră. Așa că lui Debye i se cuvine prioritatea, cu câteva săptămîni. Peste mulți ani, colaboratorul meu, M. Blackman, a arătat prin calcule detaliate că aproximația lui Debye, care folosește un model continuu al cristalelor și care a ținut seama de atomistică doar prin întreruperea spectrului oscilatoriu în finit, dă greș în cazul temperaturilor joase, în timp ce teoria Born — Kármán își păstrează valabilitatea și în acest domeniu.

Pe vremea aceea, Von Kármán, împreună cu mine și alți doi tineri, Renner și Bolza, am închiriat o casă în Dahlmannstrasse. Ne-am hotărît să-i dăm un nume plăcut și, prin alăturarea primelor silabe ale numelor noastre, am obținut „Bokarebo“, ceea ce suna destul de drăguț, dar care a fost în curînd în mod esențial îmbunătățit cu ajutorul articolului spaniol „El“. Trebuie să vă povestesc cum s-a întîmplat. Am angajat o menajeră, care era soră medicală și dorea să aibă la dispoziție o casă proprie, în care să poată îngriji oameni în vîrstă, cu corpul și spiritul bolnav. Von Kármán încercă s-o convingă că noi am fi astfel de oameni, ce-i drept nu tocmai slabi în ce privește corpul, dar în ce privește spiritul destul de bolnavi în raport cu oamenii normali, pe care știința nu i-a contaminat. Ea a acceptat, ne făcea de mîncare și ne prezida masa la care, în afară de noi, locatarii, se mai strîngeau și cîțiva tineri oameni de știință, printre care Paul Ewald. După cîteva zile, gospodina, pe care o chema sora Annie, ni se plînsese, mie și lui Von Kármán, că în majoritatea cazurilor conversațiile noastre de la masă sînt de neînțeles și, în afară de aceasta, adeseori nelălocul lor. Noi am răspuns : „Adică la ce vă puteți aștepta de la niște oameni slabi la minte ?“ Dar ea n-a încetat să se plîngă. Atunci, am hotărît că ne lipsește o persoană feminină care să poată neutraliza pe sora Annie. Am publicat un anunț în ziarul local, oferind o cameră cu pensiune pentru o studentă dintr-un an superior. Peste cîteva zile sosi un taxi din care coborî o doamnă tîmără, foarte atrăgătoare, cu păr negru. I-am arătat camera, pe care ea a acceptat-o

îndată. Doamna se chema Ella Philipson, și astfel casa noastră începu să se numească „El Bokarebo“. Dar dificultățile cu sora Annie n-au încetat de îndată, deoarece Ella prefera să participe la discuțiile noastre decât să se întrețină cu sora în probleme de gospodărie. După aceea, s-a mai întâmplat ceva ; într-o zi sora Annie mi s-a plîns îngrozită că Paul Ewald o vizitează des pe Ella. Chestiunea era în afara competenței mele. În curînd, ei s-au logodit și astfel avem astăzi bucuria de a-i avea pe amîndoi, pe Ella și pe Paul Ewald, printre noi.

Revin acum la colaborarea mea cu Von Kármán. Și aici trebuie să recunosc că interesele mele nu erau deloc concentrate asupra problemei cristalelor, ci mai mult mă preocupa problema cuantelor. Teoria noastră arăta că ipoteza cuantelor, a lui Planck, nu avea nimic comun — cum credea el pe vremea aceea — cu cuplajul dintre cîmpul electromagnetic și atomii emițători și cei absorbantî, ci că era vorba de altceva, mult mai fundamental : în domeniul atomic trebuiau să fie valabile alte legi ale mecanicii decât cele uzuale. Aceasta a rezultat din faptul că obiectul „cuantificării“ erau oscilațiile normale, un concept mecanic abstract. Același rezultat se putea deduce din tratarea de către Debye a „radiației corpului negru“, la care oscilațiile normale ale cîmpului electromagnetic erau „cuantificate“ în cadrul unei cutii avînd pereții cu reflecție totală. Dar am uitat la ce s-a ajuns mai întîi : la oscilațiile normale ale cîmpului electromagnetic sau la cele ale rețelelor cristaline.

Prima mea lucrare, împreună cu Von Kármán, a apărut înainte de descoperirea lui Von Laue. Noi am considerat existența rețelelor atomice ca fiind un lucru de la sine înțeles, nu numai pentru că cunoșteam teoria grupurilor pentru structurile cristaline, întemeiată de Schoenflies și Fedorov, care explică proprietățile geometrice ale cristalelor, dar și dintr-un alt motiv. Cu puțin timp înainte, Erwin Madelung a dedus la Göttingen prima consecință dinamică a ipotezei reticulare, și anume o relație între oscilația proprie infraroșie a unui cristal și proprietățile sale elastice. Cred că această lucrare a lui Madelung trebuie să fie considerată ca începutul teoriei dinamice a cristalelor.

Lucrarea lui Von Laue despre difracția radiațiilor Roentgen, care a confirmat experimental structura reticulară, a apărut între prima și a doua noastră lucrare. Este remarcabil că nici în cea de-a doua lucrare a noastră nu există vreo referire la Von Laue. Pot să explic aceasta numai prin faptul că reprezentarea reticulară ne părea atât de certă, încît lucrarea lui Von Laue am considerat-o doar ca o confirmare binevenită, dar nu ca o descoperire nouă și în cel mai înalt grad tulburătoare, cum era de fapt.

Von Laue personal s-a ocupat doar puțin cu determinarea structurilor cristaline. Cînd, după mulți ani, l-am întrebat asupra cauzelor acestui lucru, mi s-a răspuns: „Mă interesează numai principiile generale mari, iar cercetarea cazurilor particulare o las cu plăcere pe seama altora“. Poziția mea era asemănătoare. Am continuat totuși lucrul în ce privește problemele dinamicii reticulare din două motive: în primul rînd, pentru că aceasta mă edifica asupra eșecului mecanicii clasice în domeniul atomic și indica o direcție în căutarea unei teorii mai bune; în al doilea rînd, furniza o mulțime de probleme potrivite, ca lucrări de doctorat pentru elevii mei.

Revin acum la anul 1912. În vremea aceea, drumul lui Von Kármán se despărți de al meu. El s-a concentrat asupra teoriei curenților de gaze lichide, în care în curînd deveni specialist atît din punctul de vedere al științei pure, cît și al celei aplicate și al tehnicii. Eu m-am îndreptat spre teoria atomului și m-am decis ca înainte de toate să dezvolt sistematic dinamica rețelelor cristaline.

Nu este simplu să descrii specialiștilor de astăzi natura acestei lucrări. Specialiștii sînt obișnuiți cu utilizarea unor concepte care se referă la geometria și dinamica rețelelor, dar care pe atunci încă nu existau. Descrierea periodicității tridimensionale, a energiei potențiale ca funcție a deplasărilor particulelor situate în punctele reticulare, formularea ecuațiilor de mișcare pentru aceste particule, practic infinit de multe, utilizarea analizei tridimensionale a lui Fourier și altele trebuiau să fie de-abia descoperite. Unicul model de care ne putem folosi era cazul unidimensional, adică lanțul liniar de atomi; aici deosebirea dintre ramurile optice și cele acustice ale spectrului oscilațiilor era evidentă. Am consacrat mult timp și efort pentru a

arăta că aceeași deosebire are loc pentru fiecare rețea tridimensională formată din atomi de mai multe feluri. Problema care mi se părea atunci cea mai urgentă este considerată astăzi ca fiind ceva banal: dacă numărul constantelor elastice ale cristalului cu asimetrie maximă este 21 sau 15? Ambele numere proveneau de la Cauchy: primul, el îl obținuse din teoria unui mediu continuu și anizotrop de simetrie minimă; al doilea, din ipoteza că cristalul ar fi constituit din particule sollicitate de forțe centrale. Am stabilit că această deosebire de șase unități se poate înțelege ușor, deoarece în general un cristal nu este o rețea simplă (rețea Bravais), ci formată din mai multe rețele de acest fel. Aici există o strânsă legătură cu diferitele ramuri ale spectrului oscilațiilor. Am cercetat apoi toate proprietățile mecanice, electrice și optice ale cristalelor care se cunoșteau pe atunci, inclusiv cele în legătură cu propagarea undelor electromagnetice. Lucrările de pionierat ale lui Ewald în acest domeniu îmi erau cunoscute. Profesorul meu, marele matematician Hilbert, era atât de impresionat de cercetările lui Ewald, încât le-a tratat într-un curs al său, și anume cu o metodă oarecum diferită, care se baza pe analiza Fourier. Urmându-l pe Hilbert, am putut construi o teorie clară și concisă a fenomenelor electromagnetice în cristale, pe care am expus-o în partea a doua a cărții mele (despre care voi mai vorbi).

Metoda folosită de mine pentru rezolvarea ecuațiilor de oscilații ale cristalelor provine tot de la Hilbert. Ea a fost alcătuită după modelul tratării de către el a ecuației de ciocnire a lui Boltzmann în teoria cinetică a gazelor. Legile macroscopice, fenomenologice, apăreau aici în calitate de condiții ale rezolubilității ecuațiilor de aproximare succesivă a unei serii de puteri după un parametru mic. Această lucrare a lui Hilbert este puțin cunoscută, mult mai puțin decât cercetările lui Enskog și Chapman; în ce măsură se bazează aceste cercetări pe cele ale lui Hilbert n-aș putea spune.

Între timp, a izbucnit primul război mondial și aproape în același timp am căpătat prima chemare la catedră, și anume ca profesor agregat la Universitatea din Berlin, cu misiunea specială de a ușura sarcinile didactice ale lui Max Planck. În primăvara anului 1915 ne-am mutat la

Berlin și eu mi-am început cursul. În același timp, am așternut pe hîrtie rezultatele lucrărilor mele de dinamica rețelelor. În curînd s-a constatat că erau prea ample și complicate pentru a putea fi publicate sub forma unor comunicări în reviste. Așa că am decis să scriu o carte și am început să caut un editor. Firma B. G. Teubner din Leipzig a acceptat cartea. Nu primeam nici un onorariu, ci trebuia să mă mulțumesc cu cîteva cărți ale editurii și cîteva tablouri bune de atîrnat în camera copiilor (care pe atunci în casa noastră începea tocmai să se populeze). Aceasta arată cît de prudenți pot să fie editorii față de autorii tineri.

Printr-o muncă încordată am reușit să-mi închei manuscrisul înainte de a fi încorporat. Lectura corecturilor am făcut-o parțial în condiții de-a dreptul dificile — într-o baracă a lagărului din Döberitz, unde am fost repartizat într-un grup de fizicieni (printre care Meissner, cunoscut mai tîrziu prin lucrarea sa de supraconductibilitate), care avea sarcina să elaboreze comunicarea fără fir între un avion și personalul său terestru.

Dar, în curînd prietenul meu Rudolf Ladenburg (de la Institutul Kaiser-Wilhelm pentru fizică din Dahlem, pe vremea aceea căpitan de cavalerie, iar mai tîrziu profesor la Princeton, New Jersey, S.U.A.) a obținut mutarea mea la Comisia de încercări a artileriei, unde el întemeiase și conducea o nouă ramură a științei militare, anume metodele sonometrice, care serveau la aflarea poziției unui tun prin măsurarea diferențelor la timpul de sosire a detunăturii în diferite locuri. Din grupul nostru făceau parte prietenul meu Erwin Madelung și un fost elev de-al meu, Alfred Landé (mai tîrziu profesor la Universitatea Columbia, din Ohio, S.U.A.). Landé și cu mine ne-am decis să continuăm lucrările științifice. În birourile noastre ne-am așezat cîte două sertare, unul pentru sonometrie, celălalt pentru dinamica rețelelor. Ne bazam pe faptul că ofițerul de artilerie care conducea secția noastră nu ar fi fost în stare să deosebească cele două feluri de hieroglife. Scopul nostru era să calculăm energia reticulară absolută a cristalelor ionizate, în ipoteza că fiecare ion poate fi reprezentat printr-un model inelar al lui Bohr (un nucleu încon-

jurat de inele electronice coplanare). Această ipoteză conduce la o formulă de forma :

$$U = - \frac{\alpha e^2}{r} + \frac{b}{r^n},$$

pentru energia potențială a rețelei, cu $n = 5$. Primul termen reprezintă interacțiunea electrostatică (Coulomb) a întregii sarcini ionice (r fiind constanta reticulară, e — sarcina electronică, iar α o constantă numerică), iar al doilea — repulsia electrostatică a orbitelor electronilor, a căror orientare trebuia să corespundă cu simetria rețelei (b și n sînt niște constante). Fiecare din acești doi termeni își are mica sa istorie, pe care aș vrea s-o povestesc aici.

Landé și cu mine întîmpinam dificultăți în ce privește însumarea potențialelor Coulomb, din cauza proastei convergențe a sumelor reticulare. Madelung, care a asistat la discuțiile noastre, ne-a făcut într-o zi surpriza unei metode de convergență rapidă pentru determinarea acestor sume reticulare ; adică a numărului α din formula de mai sus, care apoi a fost pe bună dreptate denumit „numărul lui Madelung“. Mai tîrziu, Ewald a stabilit o metodă mai generală pentru calcularea acestor sume reticulare ; aplicarea sa în cazul energiei reticulare electrostatice a confirmat rezultatele lui Madelung.

Al doilea termen al formulei nu a dus la nici un fel de dificultăți matematice, deoarece putea fi stabilit prin însumare directă. Dar ne-a adus alte griji, care s-au datorat lipsei noastre de atenție. Cînd am scris suma repulsiilor traiectoriilor electronice pentru toate perechile de atomi din rețea ca sumă dublă deasupra indicelui atomului, am uitat de factorul $1/2$, necesar pentru a nu număra de două ori fiecare termen. Cu acest procedeu eronat am stabilit valori pentru constantele absolute ale rețelelor și pentru compresibilitățile halogenurilor alcaline care corespundeau perfect cu observațiile. Ne-am bucurat mult de aceasta și l-am rugat pe Einstein să prezinte lucrarea la Academia din Berlin. Dar în curînd am găsit eroarea și am fost profund deprimăți. Constantele reticulare nu erau prea atinse, însă compresibilitățile erau false, eroarea fiind un factor 2.

Am alergat la Einstein, a cărui locuință era foarte aproape de locul nostru de muncă, și l-am rugat să retragă lucrarea. El rîse și spuse: „Sînt absolut sigur că ideea dumneavoastră este rezonabilă. Nu renunțați la lucrare. Eroarea dumneavoastră se va transforma astfel într-o descoperire“.

Și a avut dreptate. Am renunțat la calculul valorilor absolute cu ajutorul modelului inelar al lui Bohr; în schimb, am determinat exponentul n din valorile empirice ale constantelor și ale compresibilităților reticulare. Am găsit astfel pentru halogenurile alcaline $n = 9$ și de aici valori demne de încredere pentru energiile reticulare, care au putut fi verificate cu ajutorul efectelor chimice termice (despre care voi vorbi mai departe).

Acest rezultat $n = 9$ m-a convins că modelul lui Bohr cu traiectorii plane ale electronilor nu poate fi corect. Atomii trebuie să aibă o simetrie spațială mai complicată. A fost al doilea caz în care dinamica reticulară punea în evidență un eșec al reprezentărilor clasice pe scara atomică. Astfel, se punea problema căutării unei mecanici cu totul noi. Mai târziu, au ieșit la iveală alte inconsistențe ale teoriei semiclasice a lui Bohr (de exemplu, la calculul termenilor din spectrul heliului după rețeta lui Bohr și Sommerfeld, calcul pe care l-am încercat împreună cu Heisenberg, cu rezultat pe deplin negativ), ceea ce a condus pînă la urmă, în anul 1925, la constituirea mecanicii cuantice de către Heisenberg și Jordan, împreună cu mine. Deși pentru mine asemenea considerații generale au fost întotdeauna mai importante decît rezultatele particulare, totuși am continuat lucrările relative la diferite probleme ale dinamicii rețelelor, pentru că nu erau lipsite de propria lor seducție. Nu vreau însă să vă plictisesc cu descrierea acestor cercetări, ci numai să enumăr cîteva pe scurt: activitate optică (proprietatea anumitor cristale de a roti planul de polarizare a luminii polarizate care le străbate), fluidele anizotrope și comportarea lor optică, aplicații chimice ale energiei reticulare. Cred că această din urmă problemă a fost primul exemplu de calcul al unei călduri de reacție chimică pe baza unor date pur fizicale. La această lucrare am fost avantajat de faptul că marele chimist Fritz Haber s-a interesat de ea; el a găsit o reprezentare grafică a procedului meu, care de

atunci a devenit cunoscut sub numele de proces circular Born-Haber. Datorită acestei lucrări, am venit în contact cu cercuri de chimiști, și îmi amintesc cât de încordat eram când trebuia să iau cuvîntul în fața unei conferințe de chimiști și să ascult discuțiile lor. Căci cunoștințele mele de chimie nu au depășit niciodată halogenurile alcaline și alte combinații la fel de simple.

Cînd în 1919 am preluat catedra de fizică teoretică de la Frankfurt și peste doi ani pe cea de la Göttingen, am continuat împreună cu elevii mei lucrările de dinamica rețelor; noi am cercetat, de exemplu, termodinamica statistică a cristalelor și, după o propunere a lui Debye, am folosit în energia potențială termeni anarmonici.

Trec acum la lucrările pe care le-a executat grupul meu de la Edinburgh, unde am sosit în 1936 ca succesor al lui Charles Galton Darwin. Aici vreau să desprind de asemenea doar cîteva puncte. Încă în anul 1914 publicasem un articol mai amplu despre diamante; am luat în considerare două feluri de forțe ale atomului de carbon; o forță centrală, între atomii din vecinătatea imediată, și o forță unghiulară de rotație, determinată de trei atomi vecini. Astfel, aveam două constante atomice independente. Dar un cristal cubic are trei constante de elasticitate. De aceea, teoria stabilește o relație între ele, și anume următoarea:

$$\frac{4 c_{11} (c_{11} - c_{44})}{(c_{11} + c_{12})^2} = 1.$$

Pe vremea aceea (1914) nu existau încă măsurători ale constantelor de elasticitate ale diamantelor. A trebuit să aștept 31 de ani. În sfîrșit, în 1945, la Edinburgh, am aflat că constantele de elasticitate se pot măsura cu ajutorul metodelor ultrasonice. Mi-am amintit de vechea formulă și am scris prietenului meu Franz Simon (mai tîrziu Sir Francis Simon), din Oxford, pentru ca el să propună această problemă unuia dintre elevii săi. Nici nu apucasem să semnez scrisoarea, că poștașul mi-a adus poșta zilei, care cuprindea un studiu al fizicianului indian Bhagavantam, care descria tocmai aceste măsurători. Am introdus

valorile sale numerice pentru constantele de elasticitate în formula mea și am obținut pentru valoarea din stînga nu chiar 1, dar 1,1, ceea ce este o potrivire destul de satisfăcătoare. Apoi am rugat-o pe una dintre elevele mele, Miss Helen Smith, să verifice formula cu metode moderne și s-o generalizeze, ținînd seama de frecvența determinată a radiațiilor infraroșii pornind de la căldura specifică. (Această Miss Smith era de altfel o personalitate remarcabilă. Își încheiase tocmai teza și obținuse diploma de doctor, cînd prima bombă atomică a fost aruncată asupra Hiroshimei. Atunci, ea se hotărî să nu mai aibă niciodată de-a face cu fizica ; a studiat dreptul și este astăzi un avocat de renume la Aberdeen. Aș fi dorit ca și alți fizicieni să fi dovedit o asemenea tărie a convingerilor etice.) Această lucrare a fost punctul de pornire pentru un șir întreg de cercetări asupra stabilității rețelelor și a stabilirii relațiilor dintre constantele materiale macroscopice cu ajutorul unor ipoteze simple și firești cu privire la forțele reticulare.

Amintesc aici cîteva exemple. Primul se referă la trei rețele cubice simple (Bravais). Dacă pornim de la ipoteza forțelor centrale, care solicită fiecare pereche de atomi și la care valoarea potențialului scade o dată cu distanța, atunci, după cum se poate demonstra riguros, rețeaua centrată la suprafață este totdeauna stabilă ; rețeaua cubică simplă este nestabilă, iar cea centrată spațial poate fi stabilă sau nestabilă, după mărimea scăderii de potențial în funcție de distanță. În cazul cristalelor hexagonale, rețeaua simplă (Bravais) este iarăși nestabilă, în schimb este stabilă cea definită prin cea mai densă (împachetare sferică). În plus, se poate arăta că, cu totul independent de legea forțelor, cele patru constante de elasticitate se află într-un biraport de numere întregi, și anume :

$$c_{13} : c_{12} : c_{11} : c_{33} = 8 : 11 : 29 : 32.$$

Este remarcabil că același rezultat a fost descoperit cu totul independent de către profesorul G. Leibfried, după cîte am aflat cînd am revenit în Germania. Atunci cînd îmi scriam lucrarea, constantele de elasticitate erau măsurate (de W. Voigt) numai pentru un singur cristal hexagonal, și anume pentru beriliu. Este vorba despre o com-

poziție complicată de mai mulți atomi, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$, dar marii atomi acizi sînt ordonați în rețele aproape exact, ca cea mai densă împachetare de sfere. Constantele observate se comportă ca numerele :

$$8 : 11,6 : 32,6 : 28,6,$$

care se apropie surprinzător de exact de valorile teoretice de mai sus.

Dar eu nu pot să descriu aici toate cercetările asupra rețelilor cristaline care au avut loc la Institutul din Edinburgh. Ele s-au extins asupra ramurilor celor mai diferite : termodinamica și fuziunea, efectul Raman, dispersia difuză (termică) a radiațiilor Röntgen, piroelectricitatea. Ultimul din fenomenele amintite are particularitatea că parametrul piroelectric urmează o lege T^2 , nu o lege T^4 , ca energia și celelalte mărimi termodinamice. Explicația nu este întru totul simplă. Unele din aceste rezultate sînt expuse în a doua mea carte de dinamica rețelilor, pe care am scris-o la Edinburgh cu colaboratorul meu chinez Kun Huang (în prezent profesor la Pekin). Scopul principal al cărții era deducerea sistematică a dinamicii reticulare din mecanica cuantică. O secțiune conține teoria anumitor efecte optice care provin din caracterul anarmonic al forțelor reticulare. Dinamica reticulară a fost elaborată în esență de către Kun Huang și conduce la previziuni cu privire la structura fină a domeniilor de absorbție infraroșie la unele tipuri de cristale simple. Am aflat mai târziu cu bucurie că aceste rezultate teoretice au fost cercetate și confirmate experimental de către un grup de fizicieni din Freiburg.

Lucrările mele din domeniul rețelilor le-am limitat la cristale ideale, cu toate că îmi era clar că teoria cristalelor reale, pline de defecte, este practic mult mai importantă. Aceste lucruri le-am lăsat pe seama generației mai tinere.

Încercările mele de a construi un sistem de notații care să fie unanim acceptat n-au fost prea fructuoase. În decursul timpului, am fost nevoit și eu să modific propriul meu sistem de notații, și de aceea nu mă pot plînge dacă alții au resimțit aceeași nevoie. De aici am tras concluzia

că este mai importantă capacitatea de adaptare decît regulile rigide.

Acum aştept cu încordare să aud ce progrese au fost obţinute în acest domeniu în care eu am făcut cîtiva din primii paşi.

POSTFAȚĂ REDACTATĂ DUPĂ ÎNCHEIEREA CONFERINȚEI

Felul în care a decurs această conferință m-a surprins mult. După ce m-am retras de la catedra mea din Edinburgh în anul 1953, am renunțat să mai urmăresc literatura din domeniul fizicii. Pe vremea mea, interesul pentru dinamica rețelelor se limita la un număr restrîns de specialiști. Acum am impresia că s-a răspîndit în lumea întreagă și a devenit o ramură prosperă a fizicii. Deși vîrsta și slabele mele puteri fizice m-au împiedicat să ascult toate comunicările, și în plus multe mi-au scăpat, datorită auzului prost, totuși spre uimirea mea, mi-a devenit clar că și acum nu cristalele reale imperfecte domină scena, ci tot vechile, bunele cristale ideale joacă rolul principal. Aceasta se întemeiază pe cît se pare pe folosirea unei noi metode experimentale, anume împrăștierea neutronilor cu ajutorul căreia curbele de dispersie a oscilațiilor reticulare pot fi observate direct. Cînd am înțeles aceasta, mi-a părut rău că în cuvîntul meu introductiv nu am vorbit mai în amănunt despre o grupă specială de lucrări ale Institutului meu din Edinburgh, ci numai le-am amintit ; am în vedere radiația difuză a radiațiilor Röntgen.

Teoria lui Debye a dependenței temperaturii de diagramele Laue (1913) a fost generalizată de către președintele acestui congres, Ivar Waller, în remarcabila sa teză din 1925, unde a folosit aproximări superioare. El a reușit astfel să lămurească fondul difuz al petelor lui Von Laue. Cu optsprezece ani mai tîrziu am scris o dare de seamă despre aceste cercetări și altele conexe în „Reports of Progress in Physics“, vol. IX, 1942—1943, pag. 294 (publicat în ale mele *Scrieri alese*, vol. I, No. 36, p. 587, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen), unde spuneam următoarele : „Lucrarea lui Waller conține formulele complete pentru tipul general al rețelelor ; cercetările teoretice ulterioare nu au adăugat nimic nou, în mod esențial, în afară

de unele îmbunătățiri ale expunerii și de aplicațiile practice". Atenția mea asupra acestei probleme a fost atrasă de atacurile lui Sir C. V. Raman și ale elevilor săi împotriva dinamicii cristalelor, atacuri în cadrul cărora ei interpretau greșit petele difuze. Am respins aceste atacuri mai întâi într-o lucrare comună cu eleva mea Miss K. Sarginson („Proc. Roy. Soc.", *A* 179, 1941 p. 69), apoi, mai amplu, în darea de seamă mai sus citată. Rezultatul, al cărui conținut esențial era cuprins de-acum în teza lui Waller, poate fi exprimat într-o formă concisă ca o relație explicită între matricea dinamică $\mathfrak{D}$ (matricea coeficienților forțelor cvasielastice) și matricea dispersiei $\mathfrak{S}$ (matricea coeficienților de dispersie în diferite direcții); $\mathfrak{D}$ și $\mathfrak{S}$ sînt amîndouă funcții ale vectorului de diferență $\mathbf{Q}$ dintre vectorii de undă ai undei împrăștiată și ai celei incidente. Relația respectivă este următoarea :

$$\mathfrak{S} = \frac{h}{4\pi} \mathfrak{D}^{-\frac{1}{2}} \coth \left(\frac{h \mathfrak{D}^{\frac{1}{2}}}{4\pi k T} \right).$$

Prin urmare, matricea dinamică se poate obține prin măsurarea matricei dispersiilor, adică prin determinarea intensității de dispersie în toate direcțiile. După cum petele lui Von Laue au dezvăluit geometria rețelelor, tot astfel fondul difuz le dezvăluie dinamica. Pe vremea aceea (1943), specialiștii în radiații Röntgen nu și-au dat seama de importanța acestui fapt; au făcut excepție cîțiva, în primul rînd Kathleen Lonsdale și școala ei. Acum se pot face experimente de dispersie cu neutroni care acționează mult mai puternic decît radiațiile Röntgen. N-am studiat teoria dispersiei neutronilor, dar nu cred ca ea să poată diferi mult de aceea a radiațiilor Röntgen.

Îmi face o deosebită plăcere că acea ramură a științei noastre fizice, căreia i-am dedicat o mare parte a timpului meu și a capacității mele de muncă, înflorește astăzi mai mult ca oricînd.

*Din corespondența lui Einstein
cu Max și Hedwig Born **

Despre Einstein am vorbit adeseori. În cartea de față sînt trei studii dedicate lui dintre care unul intitulat *Amin-tiri despre Einstein*. Faptul că revin încă o dată la această temă se explică prin aceea că răgazul vîrstei mele l-am folosit pentru a reciti scrisorile lui Einstein. Sînt peste 50, scurte și lungi. Mi le-am copiat pe toate, pentru ca astfel să le asigur conservarea. În acest fel, prietenul mi-a apărut din nou atît de viu, încît l-am văzut în fața mea aievea, i-am auzit vocea și rîsul său minunat.

Cînd contele Bernadotte m-a solicitat să țin la Lindau o conferință pe o temă generală, mi-a venit ideea să transmit cercului întrunit aici impresia amintirilor trezite de aceste scrisori. Vreau mai cu seamă să comunic și să comentez unele pasaje mai mici privitoare la probleme de domeniul filozofiei, al concepției despre lume și al fizicii, dar atunci cînd va fi cazul, voi da și unele caracterizări ale problemelor timpului. Chestiunile propriu-zis politice, deși au avut un rol foarte mare în viața lui Einstein, va trebui să le evit aici, deoarece ele depășesc cadrul acestei întruniri. Einstein a păstrat toate scrisorile mele ca și ale soției mele. Dacă va fi publicată vreodată întreaga corespondență, atunci se vor reliefa și alte trăsături ale personalității sale, omise aici.

Cu mult înainte de a fi citit renumita lucrare a lui Einstein din 1905, cunoscusem latura formală, matematică, a teoriei relativității restrînsă, datorită profesorului meu

* Conferință ținută la 30 iunie 1965 la a 5-a întîlnire de la Lindau a laureaților Premiului Nobel pentru fizică. (Publicat pentru prima dată în „Physikalische Blätter”, caietul 7/1965.)

Hermann Minkowski. Cu toate acestea, lucrarea lui Einstein a fost pentru mine ca o străfulgerare care mi-a influențat gândirea mai mult decât orice alt eveniment științific. Personal, l-am cunoscut pe Einstein în 1909, la Adunarea cercetătorilor naturii de la Salzburg. N-aș putea spune dacă am corespondat pe atunci, deoarece n-am salvat nici o scrisoare din vremea aceea.

După cum se știe, Einstein a fost chemat în 1913 într-un post de cercetare în cadrul Academiei de la Berlin, ca succesor al lui Van't Hoff, iar eu, un an mai târziu, am fost chemat la Universitatea din Berlin ca profesor supleant, pentru a-l descărca pe Planck de sarcinile din învățământ.

Noi ne-am mutat în primăvara anului 1915 la Berlin și am început să-mi țin prelegerile. Dar în curînd a trebuit să întrerup și să devin soldat. După cîteva luni petrecute într-un detașament de aviație, am fost repartizat la Comisia de încercări a artileriei, o instituție militară, unde, sub conducerea prietenului meu Rudolf Ladenburg, un grup de fizicieni lucrau la elaborarea unor metode de informație tehnică pentru artilerie. Clădirea acestui serviciu din Spichernstrasse era foarte aproape de locuința lui Einstein, din așa-numitul „cartier bavarez”. Astfel se explică că-l vizitam adesea în timpul pauzei de la prînz. În curînd, începu și el să vină la noi acasă pentru a face muzică cu mine și a discuta, soția mea participînd și ea cu animație la aceste discuții. Vederile noastre politice coincideau în mare măsură. Dar nu despre aceasta voi vorbi aici.

Prima corespondență primită de la Einstein, aflată în colecția mea este o carte poștală care se referă la un articol al meu apărut în „Physikalischen Zeitschrift”, 1916. Articolul este o prezentare lapidară a teoriei relativității generale. Nici astăzi nu l-aș scrie mult diferit. A devenit o modă de a considera drept secundar punctul de pornire relativist al lui Einstein anume că intensitatea unui cîmp gravitațional dintr-o ladă este relativă la accelerația lăzii; se consideră ca principale ecuațiile de cîmp ale metricii. Eu însă îi prefer acestei concepții, susținută mai ales de prietenul meu rus Fock, prezentarea inițială a lui Einstein, așa cum am redat-o în articolul acela de acum 50 de ani. În cartea sa poștală, Einstein spune despre lucrarea mea

că a citit-o „cu sentimentul fericit... de a fi fost în întregime înțeles și recunoscut”; mai urmează cîteva cuvinte deosebit de prietenești, și cred că prietenia noastră datează de atunci.

Însă eu nu am conlucrat la teoria relativității generale; nici atunci, nici mai tîrziu. Am studiat cu atenție memoriile ample ale lui Einstein publicate în dările de seamă ale Academiei de la Berlin. Ele mi s-au părut atît de mult deasupra a tot ce aș fi putut eu obține vreodată, încît mi-am propus să nu lucrez niciodată în acest domeniu. Dar ideile sale le-am susținut și le-am apărut, ori de cîte ori erau atacate.

În anul 1918 Einstein se afla la Seebad Ahrenshoop, în vilegiatură, împreună cu a doua sa soție. Am primit de acolo mai multe scrisori. Aș vrea să citez dintr-una (nedatată):

„Citesc aici, printre altele, *Prolegomenele* lui Kant și încep să înțeleg uriașa influență sugestivă pe care a exercitat-o și continuă încă să o exercite acest băiețaș. Dacă te declari de acord cu el asupra judecăților sintetice a priori, înseamnă că te-ai prins. Acest «a priori» trebuie să-l atenuez pînă la «convențional» pentru a nu fi nevoit să-l contrazic, dar și în acest caz apar nepotriviri în ceea ce privește amănuntele. În orice caz, este foarte plăcut de citit, chiar dacă nu e așa de frumos ca la predecesorul său Hume, care avea și mult mai mult instinct sănătos...”

Mi se pare înviorător ca unul dintre eroii filozofiei germane să fie denumit familiar „băiețaș”. Din asemenea remarci am învățat lipsa de respect pe care trebuie să o avem față de ideile filozofice, dacă vrem să creăm ceva în fizica teoretică. Am încercat să transmit această poziție elevilor mei și cred că nu fără succes.

Asemenea expresii cam îndrăznețe sînt numeroase. Într-o scrisoare din 1919 m-am scuzat pentru rămînerea în urmă în corespondență, explicînd-o prin obligații literare. La care Einstein răspunde: „Chiar și promisiunile literare — de exemplu față de Sommerfeld — vreți să le respectați? Asta e prea mult. Dacă Shakespeare ar fi trăit în condițiile de astăzi, atunci desigur că versul său «Jupiter rîde de jurămintele de dragoste», care oricum este cam tare;

l-ar fi schimbat cu plăcere în... «uitatele promisiuni în ce privește referatele».

Aceeași scrisoare conține următoarele considerente de domeniul fizicii : „Teoria cuantelor îmi produce emoții cu totul asemănătoare ca și dumneavoastră. De fapt, ar trebui să ne fie rușine de succes, deoarece el a fost obținut după principiul iezuit : «O mînă nu trebuie să știe ce face alta». Aceasta caracterizează foarte bine felul în care se jongla pe atunci, înainte de apariția mecanicii cuantice, cu conceptele mecanicii clasice și ale teoriei cuantelor. Apoi, în aceeași scrisoare, urmează o predică împotriva pesimismului meu politic, care era provocat de dările de seamă ale ziarelor cu privire la tratativele de pace de la Versailles. Einstein scrie : „Are oare dreptul un frate X, uns cu toate cele și pe deasupra și determinist, să plîngă cu lacrimi în ochi că și-a pierdut credința în omenire ? Tocmai comportarea instinctuală a oamenilor de astăzi în lucrurile politice este de natură să renască credința în determinism“.

Aici apare pentru prima oară crezul său determinist, e adevărat că nu în legătură cu fizica, unde orice dubiu în ce privește cauzalitatea strictă i s-ar fi părut o nebunie, ci în legătură cu comportarea politică a oamenilor. O expunere amănunțită a credinței sale în cauzalitate, dar și o considerare adîncă asupra limitelor sale sînt conținute într-o scrisoare către soția mea. Scrisoarea este adresată la Frankfurt, unde fusesem chemat în 1919 ca succesor al lui Max von Laue. Pasajul este următorul : „Și acum să ne ocupăm de filozofie. Ceea ce dumneavoastră numiți materialismul lui Max este pur și simplu modalitatea cauzală de considerare a lucrurilor. Acest fel de a considera lucrurile răspunde întotdeauna numai la întrebarea „de ce ?“, dar niciodată la întrebarea „pentru ce ?“. Nici un fel de principiu utilitarist și nici un fel de alegere impusă nu ne pot duce mai departe. Așadar, cînd cineva întreabă : „Pentru ce să căutăm să ne încurajăm unul pe altul, să ne ușurăm viața unul altuia, să facem muzică frumoasă și să producem idei subtile“, atunci trebuie să-i răspundem : „Dacă tu nu simți singur aceasta, atunci nici altul nu ți-o poate lămuri. Fără aceste elemente primare nu sîntem nimic și mai bine n-am trăi de loc. Chiar dacă cineva

ar dori să facă o încercare de explicare cauzală, urmărind să demonstreze că aceste lucruri ajută la menținerea și favorizarea omenescului, de-abia apare întrebarea „pentru ce?”, iar orice răspuns pe o bază „științifică” ar fi și mai lipsit de speranță. Așadar, dacă vrem cu orice preț să procedăm științific, putem să încercăm să reducem toate țelurile noastre la cât mai puțin, din care să deducem pe toate celelalte. Dar aceasta vă va lăsa rece. În ce privește aprecierea pesimistă a cunoașterii, nu sînt de acord. Unul din lucrurile cele mai frumoase în viață e să ai o privire clară de ansamblu asupra conexiunilor; aceasta nu se poate nega decît cînd ești într-o dispoziție cu totul sumbră, nihilistă“. El a ajutat-o pe soția mea, după cum relatează ea într-un articol despre Einstein, publicat în „Weltwoche“, să nu se mai simtă în cercul savanților din domeniul științelor exacte ca o persoană exilată printre gheturile din Lună. Odată, ea l-a întrebat pe Einstein: „Oare credeți că într-o zi toate se vor putea explica simplu, pe bază pur științifică?“ „Da — fu de părere Einstein — aceasta se poate concepe, dar n-ar avea nici un sens. Ar fi o reprezentare cu mijloace inadecvate, ca și cum ai reprezenta o simfonie a lui Beethoven printr-o curbă a presiunii aerului“.

La 9 noiembrie 1919 am primit o scurtă scrisoare, care începea astfel: „Așadar, de aici încolo să ne spunem tu...“ Să nu vă mai spun ce bucurie și cinste a fost aceasta pentru mine. Pentru oamenii adulți, care încep să se tutuiască, adesea nu este ușor să se obișnuiască. Dar în cazul lui Einstein a fost simplu, pentru că el era foarte natural și deschis. Nu știu dacă eu am avut vreo revenire la „dumneavoastră“. În scrisorile lui Einstein asemenea reveniri sînt foarte puține și numai atunci cînd vorbește despre ceva care l-a supărat mult. Asemenea întâmplări au avut loc și anume, mai cu seamă în urma felului în care se purta oficialitatea cu el. Noi eram de părere că el este prea conciliant față de ziaristii insistenți. Am încercat să-l acopăr față de atacurile pseudoștiințifice și am scris din cînd în cînd și articole de ziar în apărarea lui. Într-o scrisoare din 9 decembrie 1919 el îmi scrie despre un asemenea caz. „Articolul tău din «Frankfurter Zeitung» m-a bucurat

mult. De-acum însă vei fi ca și mine, deși poate într-o măsură mai mică, persecutat de ziariști și de alții de teapă lor. Cu mine este așa de prost, încît abia de mai pot respira. Așa că ce să mai vorbim despre o muncă rațională". Apoi mă pune în gardă în ce privește atacurile unui anumit om : „Economisește-ți temperamentul și nu mai da atenție pălăvrăgelii acestui individ. Demonstrația sa pentru cauzalitatea apriorică este într-adevăr înălțătoare". În aceeași scrisoare urmează o dare de seamă despre o vizită la Rostock, cu o zugrăvire hazlie a serbărilor jubiliare ale universității — el nu lua niciodată în serios asemenea lucruri —, precum și o relatare despre o vizită la filozoful Schlick, care mai tîrziu a lucrat la Viena și a întemeiat acolo școala pozitivismului logic, în floare și astăzi, mai ales în America. O vreme, Einstein a fost foarte impresionat de argumentația acestei teorii a cunoașterii, dar mai tîrziu a criticat-o. La 27 ianuarie 1920 el scrie următoarele despre teoria cuantelor : „Nu cred că problema cuantelor ar trebui rezolvată prin renunțarea la continuu". (Probabil că eu propusesem așa ceva într-o scrisoare.) „Analog, s-ar fi putut crede că relativitatea generală s-ar putea obține prin renunțarea la sistemele de coordonate. Desigur că în principiu se poate renunța și la continuu. Dar, cum să descrii mișcarea relativă a n puncte fără continuu?... cred și acum, după cum credeam și înainte, că trebuie căutată o asemenea determinare nouă cu ajutorul ecuațiilor diferențiale, încît soluțiile să nu mai aibă un caracter continuu. Dar cum??" (el a pus aici două semne de întrebare). În aceeași amplă scrisoare are mai departe o observație amuzantă despre Spengler, a cărui carte *Der Untergang des Abendlandes* (Declinul Occidentului) era pe atunci citită de toată lumea : „Acest Spengler nu m-a cruțat. Uneori seara te lași cu plăcere sugestionat de el, pentru ca dimineța următoare să rîzi. Se vede că toată monomania provine din matematica unui institutor. Antiteza sa este Euclid-Cartesius, pe care el o întrebuițează în toate cele, dar — n-ai de ce să nu admiți acest lucru — cu mult spirit. Asemenea lucruri sînt amuzante, iar dacă mîine cineva va spune contrariul cu același spirit, atunci e iarăși amuzant, dar care este adevărul, dracule !".

Apoi urmează îndată cu totul altceva, ceea ce pe noi fizicienii ne privește mai direct : „Chestiunea cu cauzalitatea mă necăjește mult și pe mine. Oare absorbția și emisiunea de lumină prin cuante vor putea fi vreodată concepute în spiritul cauzalității riguroase sau rămîne un rest statistic ? Trebuie să recunosc că în această privință îmi lipsește curajul convingerii. Dar renunț cu foarte, foarte multă neplăcere la cauzalitatea riguroasă“.

În anul 1920 am fost chemat la Göttingen ca succesor al lui Peter Debye. Ne familiarizasem tocmai la Frankfurt, ne bucuram de comoditățile și agitația marelui oraș și eram în dubiu dacă să ne ducem la Göttingen. Am cerut sfatul lui Einstein. Ni l-a dat cu multă bunăvoință, dar aceste considerente nu țin de lucrurile pe care urmează să le expun aici. Și totuși, aș vrea să citez un fragment din scrisoarea sa din 3 martie 1920, care arunca o lumină asupra propriei sale vieți : „În sfîrșit, nu este chiar așa de important unde locuiești. Cel mai bine este să vă ascultați inima, fără a sta mult pe gînduri. De altfel, ca unul care nu am rădăcini nicăieri, nu mă simt competent să dau sfaturi. Cenușa tatălui meu se află la Mailand. Pe mama am înmormîntat-o aici acum cîteva zile. Eu însumi am hoinărit neîncetat de colo pînă colo printre străini. Copiii mei sînt în Elveția, în asemenea condiții, încît dacă vreau să-i văd totul este foarte complicat. Un om ca mine își închipuie drept un ideal să fie cu ai săi undeva acasă ; el nu are dreptul de a vă da sfaturi în această chestiune“.

Noi ne-am decis pentru Göttingen, după ce am reușit să obținem numirea concomitentă și a lui James Franck.

Într-o scrisoare din 18 ianuarie 1922 figurează următoarele : „Și eu am făcut de curînd o prostie monumentală (experimentul cu privire la emisiunea de lumină cu raze-canal). Dar trebuie să ne consolăm. De gafe te vindecă numai moartea“. Citez aceasta pentru încurajarea tinerilor care mai au destule gafe de făcut. Aceeași scrisoare conține o observație încurajatoare pentru Heisenberg și pentru mine, în sensul de a duce pînă la capăt calculul termenilor atomului de heliu, conform prescripțiilor lui Bohr și Sommerfeld. Noi am întreprins această lucrare pentru a avea un exemplu clar de eșec al teoriei atomice a lui Bohr. Cu toată admirația sa pentru această teorie, Einstein

mult. De-acum însă vei fi ca și mine, deși poate într-o măsură mai mică, persecutat de ziariști și de alții de teapa lor. Cu mine este așa de prost, încît abia de mai pot respira. Așa că ce să mai vorbim despre o muncă rațională". Apoi mă pune în gardă în ce privește atacurile unui anumit om : „Economisește-ți temperamentul și nu mai da atenție pălăvrăgelii acestui individ. Demonstrația sa pentru cauzalitatea apriorică este într-adevăr înălțătoare". În aceeași scrisoare urmează o dare de seamă despre o vizită la Rostock, cu o zugrăvire hazlie a serbărilor jubiliare ale universității — el nu lua niciodată în serios asemenea lucruri —, precum și o relatare despre o vizită la filozoful Schlick, care mai tîrziu a lucrat la Viena și a întemeiat acolo școala pozitivismului logic, în floare și astăzi, mai ales în America. O vreme, Einstein a fost foarte impresionat de argumentația acestei teorii a cunoașterii, dar mai tîrziu a criticat-o. La 27 ianuarie 1920 el scrie următoarele despre teoria cuantelor : „Nu cred că problema cuantelor ar trebui rezolvată prin renunțarea la continuu". (Probabil că eu propusesem așa ceva într-o scrisoare.) „Analog, s-ar fi putut crede că relativitatea generală s-ar putea obține prin renunțarea la sistemele de coordonate. Desigur că în principiu se poate renunța și la continuu. Dar, cum să descrii mișcarea relativă a n puncte fără continuu?... cred și acum, după cum credeam și înainte, că trebuie căutată o asemenea determinare nouă cu ajutorul ecuațiilor diferențiale, încît soluțiile să nu mai aibă un caracter continuu. Dar cum??" (el a pus aici două semne de întrebare). În aceeași amplă scrisoare are mai departe o observație amuzantă despre Spengler, a cărui carte *Der Untergang des Abendlandes* (Declinul Occidentului) era pe atunci citită de toată lumea : „Acest Spengler nu m-a cruțat. Uneori seara te lași cu plăcere sugestionat de el, pentru ca dimineata următoare să rîzi. Se vede că toată monomania provine din matematica unui institutor. Antiteza sa este Euclid-Cartesian, pe care el o întrebuintează în toate cele, dar — n-ai de ce să nu admiți acest lucru — cu mult spirit. Asemenea lucruri sînt amuzante, iar dacă mîine cineva va spune contrariul cu același spirit, atunci e iarăși amuzant, dar care este adevărul, dracule !".

Apoi urmează îndată cu totul altceva, ceea ce pe noi fizicienii ne privește mai direct : „Chestiunea cu cauzalitatea mă necăjește mult și pe mine. Oare absorbția și emisiunea de lumină prin cuante vor putea fi vreodată concepute în spiritul cauzalității riguroase sau rămîne un rest statistic ? Trebuie să recunosc că în această privință îmi lipsește curajul convingerii. Dar renunț cu foarte, foarte multă neplăcere la cauzalitatea riguroasă“.

În anul 1920 am fost chemat la Göttingen ca succesor al lui Peter Debye. Ne familiarizasem tocmai la Frankfurt, ne bucuram de comoditățile și agitația marelui oraș și eram în dubiu dacă să ne ducem la Göttingen. Am cerut sfatul lui Einstein. Ni l-a dat cu multă bunăvoință, dar aceste considerente nu țin de lucrurile pe care urmează să le expun aici. Și totuși, aș vrea să citez un fragment din scrisoarea sa din 3 martie 1920, care arunca o lumină asupra propriei sale vieți : „În sfîrșit, nu este chiar așa de important unde locuiești. Cel mai bine este să vă ascultați inima, fără a sta mult pe gînduri. De altfel, ca unul care nu am rădăcini nicăieri, nu mă simt competent să dau sfaturi. Cenușa tatălui meu se află la Mailand. Pe mama am înmormîntat-o aici acum cîteva zile. Eu însumi am hoinărit neîncetat de colo pînă colo printre străini. Copiii mei sînt în Elveția, în asemenea condiții, încît dacă vreau să-i văd totul este foarte complicat. Un om ca mine își închipuie drept un ideal să fie cu ai săi undeva acasă ; el nu are dreptul de a vă da sfaturi în această chestiune“.

Noi ne-am decis pentru Göttingen, după ce am reușit să obținem numirea concomitentă și a lui James Franck.

Într-o scrisoare din 18 ianuarie 1922 figurează următoarele : „Și eu am făcut de curînd o prostie monumentală (experimentul cu privire la emisiunea de lumină cu raze-canal). Dar trebuie să ne consolăm. De gafe te vindecă numai moartea“. Citez aceasta pentru încurajarea tinerilor care mai au destule gafe de făcut. Aceeași scrisoare conține o observație încurajatoare pentru Heisenberg și pentru mine, în sensul de a duce pînă la capăt calculul termenilor atomului de heliu, conform prescripțiilor lui Bohr și Sommerfeld. Noi am întreprins această lucrare pentru a avea un exemplu clar de eșec al teoriei atomice a lui Bohr. Cu toată admirația sa pentru această teorie, Einstein

credea tot așa de puțin ca și noi că ea ar fi în vreun fel definitivă. Apoi Einstein continuă : „Dar cel mai interesant este în prezent experimentul lui Stern și Gerlach“. E evident că voia să-mi atragă atenția asupra lui ; când colo, experimentele respective au fost realizate la Institutul meu din Frankfurt, sub ochii mei.

Problema radiației — a compatibilității dintre teoria ondulatorie și cuante — continua să-l preocupe. Într-o scrisoare din 24 aprilie 1924 el scrie : „Opinia lui Bohr asupra radiației mă interesează mult. Dar n-aș vrea să mă las împins spre o renunțare la cauzalitatea riguroasă înaintea de a ne fi apărut împotriva acestui lucru cu totul altfel decât pînă acum. Ideea că un electron asociat unei radiații își alege prin propria sa decizie momentul și direcția în care vrea să se deplaseze prin salt este pentru mine insuportabilă. Dacă nu se poate altfel, atunci aș prefera să fiu cizmar sau chiar funcționar la o casă de joc decât fizician. Încercările mele de a da cuantelor o formă palpabilă au eșuat ce-i drept mereu, dar la speranță nu voi renunța încă mult timp de acum încolo“. Atunci cînd a apărut mecanica cuantică formulată de Heisenberg, Jordan și cu mine, el a scris într-o scrisoare din 7 martie 1926, adresată soției mele, că această mecanică a pus stăpînire pe sentimentele și gîndirea tuturor oamenilor preocupați de teorie. „În locul unei resemnări apăsătoare, a apărut o mare tensiune, unică în felul ei la noi, cei cu temperament sanguin“. Bucuria pe care mi-au produs-o cuvintele lui a fost potolită în curînd. La 4 decembrie 1926 scria el zdrobitoarea frază : „Mecanica cuantică merită toată stima. Dar o voce interioară îmi spune că totuși acesta nu este Iacob cel adevărat. Teoria dă multe, dar nu ne apropie de taina Bătrînului. În orice caz, sînt convins că acesta nu joacă zaruri“.

Nu mai vreau să comunic altceva din scrisorile anilor următori, în care era vorba tot mai mult de politică. Cu faptul că în primăvara anului 1933 Franck își dădu demisia din postul său, iar eu am plecat în străinătate, Einstein a fost întru totul de acord, căci : „Pentru voi amîndoi, slavă domnului, aceasta nu înseamnă nici un risc. Mă doare însă inima cînd mă gîndesc la cei tineri“ ; în continuare urmează fel de fel de planuri pentru a le veni

acestora în ajutor, de pildă proiectul unei universități în exil.

Einstein a plecat la Princeton, eu la început la Cambridge, apoi la Edinburgh. Corespondența noastră nu s-a întrerupt niciodată și dezbătea evenimentele politice ale timpului în aceeași măsură ca și problemele științifice și filozofice.

I-am trimis o mică carte de-a mea *Experiment and Theory in Physics*, în care polemizam cu teoriile sălbătice ale astronomilor Eddington și Milne și subliniam primatul experienței față de speculație. (Din păcate, acest volumaș n-a apărut niciodată în limba germană.) El mi-a răspuns la 7 septembrie 1944 : „Am citit cu mult interes conferința ta împotriva hegelianismului (adică a speculațiilor), care pentru noi teoreticienii este elementul donchihotesc, sau, ca să spun așa, drăcesc ? Dar acolo unde lipsește întru totul acest rău, această povară, apare filistinismul lipsit de speranță. De aceea, cred că «fizica iudaică» nu poate fi doborâtă“. În aceeași scrisoare, urmează mai departe un pasaj pe care l-am redat amplu în cartea mea *Natural Philosophy of Cause and Chance* (Clarendon Press, Oxford ; Dover Publications, New York) și care începe astfel : „În opiniile noastre științifice am evoluat spre antipozi. Tu crezi într-un Dumnezeu care joacă zaruri, iar eu într-o legitate deplină a unei lumi a existenței obiective, legitate pe care vreau s-o prind într-un mod pur speculativ“.

Pe vremea aceea, Einstein nu-și cruța eforturile în vederea unei „teorii unitare a câmpului“ care să cuprindă într-un sistem de ecuații atât câmpul electromagnetic, cât și pe cel gravitațional, și care pe deasupra, să mai furnizeze și cuantele, și particulele elementare. Așa cum mă durea pe mine că el nu considera valabilă mecanica cuantică și încerca mereu s-o dezmință, tot astfel pe el îl necăjea faptul că lucrările sale nu găseau audiența pe care o spera. Fizicianul polonez Leopold Infeld, care într-un timp lucrase cu mine la Cambridge, iar apoi a plecat la Princeton, la Einstein, a relatat de curînd despre aceasta într-un articol cu caracter autobiografic (publicat în „Bulletin of the Atomic Scientists“, februarie 1965). El povestește că Einstein îi spunea în repetate rînduri :

„Aici, la Princeton, ei mă consideră ca pe un bătrîn imbecil“. De fapt, era privit ca o relicvă istorică. Și totuși, tocmai atunci Einstein începea o lucrare, pe care a realizat-o cu colaboratorii săi Infeld și Hoffmann, excepțional de dificilă și importantă, și atât de temerară, încît la început Infeld nici nu voia să creadă cele susținute de Einstein. Pe atunci, teoria relativității generale se baza pe doi piloni. În primul rînd, mișcarea punctelor materiale este determinată de liniile geodozice ale lumii spațio-temporale : în al doilea rînd, metrica acestei lumi satisface ecuațiile de câmp ale lui Einstein. Einstein afirma că prima ipoteză ar fi de prisos, că ea ar rezulta din ecuațiile de câmp prin trecere la limită, la liniile de univers infinit de subțiri. La început, calculele au fost așa de voluminoase, încît nu s-au putut publica decît extrase, iar manuscrisul amplu a fost depus la Institutul din Princeton (Institute for Advanced Study). Ceva mai tîrziu, și în mod cu totul independent, fizicianul rus V. Fock, de care am mai amintit, a atacat aceeași problemă cu elevii săi într-un mod oarecum diferit, inserînd aceasta în cunoscuta sa carte despre relativitate. Teoriei lui Einstein i s-a dat după moartea sa o formă perfectă de către Infeld și Plebanski, în strălucita lor carte *Motion and Relativity* (Mișcare și relativitate, Pergamon Press, Oxford 1960). În scrisorile lui Einstein din perioada respectivă găsesc numai o aluzie la aceste îndeletniciri importante ; o scrisoare nedată, probabil din anul 1936, are următorul post-scriptum „Infeld este un băiat minunat. Am făcut împreună o treabă foarte frumoasă : problema observațiilor astronomice, cu tratarea corpurilor cerești cu singularități ale câmpului. Institutul s-a purtat urît cu el. Dar eu îl voi ajuta să o scoată la capăt“. Într-adevăr, la propunerea lui Einstein, Infeld a devenit profesor la Toronto (Canada), dar în cursul „războiului rece“ a fost și acolo prost tratat și s-a întors în patria lui, Polonia.

Correspondența mea cu Einstein se referea acum la lucrurile cele mai diferite, printre care mai ales la ajutorul pentru oamenii de știință aflați în emigrație. Dar fundamentele mecanicii cuantice reveneau mereu : de pildă, în scrisoarea nedată, citată mai sus : „Continui să nu cred în caracterul definitiv al metodei statistice în teoria

cuantelor, dar mă găsesc singur cu opinia mea, în câmp deschis". Asemenea extrase aş putea da multe. Dar ajunge unul. Într-o scrisoare din 2 decembrie 1947, Einstein recunoaşte că teoria are o mare verosimilitate, dar continuă apoi astfel: „Ceea ce nu înseamnă că pot crede cu seriozitate în ea, deoarece teoria este incompatibilă cu acel principiu fundamental după care fizica trebuie să reprezinte o realitate în spaţiu şi timp, fără fantomatice acţiuni la distanţă“.

El avea în vedere situaţiile care rezultă din interferenţa amplitudinilor de probabilitate, care dacă nu sînt examinate mai adînc, pe baza principiului de complementaritate a lui Bohr, au ceva paradoxal în ele şi apoi ceea ce de obicei se numeşte „reducerea probabilităţilor“ : o stare reprezentată printr-o funcţie de undă în spaţiul de configuraţie (mai general, printr-un vector în spaţiul Hilbert) e transformată într-alta îndată ce intervine un experiment.

Pe la sfîrşitul anilor 40 am fost solicitat cu un articol pentru volumul *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* din seria „Biblioteca filozofilor în viaţă“ („The Library of Living Philosophers“), care apare în America, editată de P. A. Schilpp. Dintre volumele apărute acolo, îl am şi pe acela referitor la Bertrand Russell. Ele încep cu o scurtă autobiografie a savantului respectiv, după care urmează însemnări critice de diferiţi autori cu privire la domeniul său de activitate şi la sfîrşit răspunsul său. Mi-am asumat sarcina de a scrie despre *Teoriile statistice ale lui Einstein*. La sfîrşitul acestui articol am abordat poziţia lui Einstein faţă de mecanica cuantică şi am opus profesiunea sa de credinţă empirică din tinereţe — extrasă dintr-un necrolog asupra lui Ernst Mach — tendinţei sale ulterioare spre speculaţie. Într-o scrisoare din 3 decembrie 1947 el îmi mulţumeşte cu următoarele cuvinte: „Este atîta căldură acolo şi se vede atît de clar cît de uimitoare şi împietrită consideri tu atitudinea mea faţă de teoria statistică a cuantelor“. Acelaşi volum conţine renumita dare de seamă a lui Niels Bohr asupra conversaţiilor sale cu Einstein cu privire la problemele epistemologice ale fizicii atomice, în cadrul cărora respinge amănunţit încer-

cările lui Einstein de a demonstra inconsistența interpretării statistice a mecanicii cuantice.

Dar Einstein nu se dădu bătut. Când în 1953 m-am retras de la catedra mea din Edinburgh, din cauza limitei de vîrstă, mi s-a dedicat un volum omagial, care conține multe articole interesante, printre care mai multe care nu privesc gloria mea, ci atacă interpretarea statistică a mecanicii cuantice : unul al lui David Bohm, unul al lui Louis de Broglie și unul al lui Einstein.

El încearcă să-și lămurească poziția cu ajutorul unui exemplu simplu, al unei particule care pendulează între doi pereți elastici. Argumentele sale nu mi s-au părut de loc convingătoare, în primul rînd pentru că n-am considerat justă formularea matematică a exemplului ; el trata așa-numitul „caz pur“, unde nu se cunoaște nimic decît prezența particulei cu energie cît mai mică posibilă, în timp ce cazul-limită clasic se referă la o anumită stare inițială de loc și de viteză, și care din punctul de vedere al mecanicii cuantice trebuie să fie reprezentată ca o mulțime de cazuri pure. Această problemă, întrucîtva complicată, este ușor de rezolvat ; în orice caz, trecerea la mecanica clasică nu duce direct la o traiectorie a particulei cu poziția inițială pregnantă, ci la un fascicul îngust de traiectorii. Ceea ce m-a condus la o reformulare a mecanicii clasice, astfel încît ea să aibă de a face numai cu stări imprecis determinate. Această reprezentare mi se pare că o depășește pe cea uzuală deterministă, deoarece ideea că există stări absolut precise, adică măsurători absolut exacte, este absurdă. Cred că mecanica clasică sub formă statistică este mai rezonabilă decît reprezentarea obișnuită pseudodeterministă, și sper că ea se va încetățeni. Unele dintre „paradoxurile“ mecanicii cuantice apar în acest caz și în cadrul tratării clasice. În loc de traiectorii, se determină o probabilitate care se propagă în spațiul de faze. Orice observație nouă stinge distribuția anterioară de probabilități și o înlocuiește cu alta ; avem așadar fenomenul de „reducere a probabilităților“, pe care l-am amintit și care îi repugna lui Einstein.

Am trimis manuscrisul meu lui Einstein. Corespon- dența care a rezultat este un haos de neînțelegeri și unele dintre scrisorile sale au un ton întrucîtva iritat. N-aș vrea însă să vorbesc aici despre aceasta. Pînă la urmă a in- tervenit Wolfgang Pauli, care era tocmai la Princeton și a încercat să lămurească fiecăruia dintre noi doi ce voia să spună celălalt. Mie mi-a reproșat, pe bună dreptate, că sînt un „auditor neatenț”, dar altfel a fost de acord cu mine și m-a ajutat să-mi îmbunătățesc textul, pînă ce a putut încuviința fiecare cuvînt. Lucrarea a apărut în 1955 în caietul pe care l-a scos Academia daneză în cinstea ce- lei de-a 70-a aniversări a lui Niels Bohr. Einstein însă și-a păstrat părerea lui.

De fapt, este vorba de o deosebire fundamentală în ceea ce privește modul de a considera natura.

Asupra filozofiei care stă la baza teoriei mele am mai meditat timp de mulți ani și apoi am expus-o foarte con- cis în volumul festiv dedicat celei de-a 60-a aniversări a lui Heisenberg¹. Ea pornește de la aceea că previziunile științifice sub nici un fel nu se referă direct la „realitate”, ci la cunoașterea de către noi a realității. Adică așa- zisele „legi ale naturii” ne permit să conchidem de la o cunoaștere momentană limitată și aproximativă la o situa- ție viitoare, firește că tot numai aproximativ descriptibilă. Acesta este un mod de gîndire care se opune categoric ace- luia al lui Einstein și deci nu e de mirare că mă privea ca pe un renegat. Și totuși, am sentimentul că am urmat fidel calea pe care ne-a trasat-o el la timpul său ; în schimb, el s-a oprit la o anumită poziție. Este vorba despre reprezentarea după care lumea exterioară, așa cum este ea în realitate, este descrisă de știință fidel și exact. Din acest punct de vedere, teoria actuală a materiei este în adevăr un haos de absurdități, și din punctul său de ve- dere Einstein avea pe deplin dreptul să respingă sau cel mult să o admită în mod provizoriu.

Aceste discuții nefructuoase și oarecum tăioase n-au influențat nici prietenia noastră, nici încrederea noastră reciprocă. Am încă multe scrisori de-ale sale, foarte ami-

¹ *Werner Heisenberg și Fizica timpului nostru*, editat de Fritz Bopp, Friedr. Vieweg & Soh, Braunschweig, 1961.

cale, printre care o felicitare în legătură cu Premiul Nobel, din 24 noiembrie 1954 : „M-am bucurat foarte mult că, în sfîrșit — chiar dacă cu o întîrziere regretabilă —, ți s-a acordat Premiul Nobel pentru contribuția ta la teoria actuală a cuantelor. Îndeosebi, interpretarea ta consecvent statistică a descrierii a lămurit doar în mod decisiv această concepție. Acest lucru mi se pare cu totul indubitabil, în ciuda corespondenței noastre asupra chestiunii, care nu ne-a dus la nici un rezultat“.

După emigrația noastră din 1933 nu l-am mai revăzut pe Einstein. În scrisorile sale din Princeton el spunea de mai multe ori că speră să poată discuta o dată cu mine personal ideile care ne despart, dar eforturile sale de a-mi procura o invitație la Institute for Advanced Study au eșuat mereu ; de ce ? n-aș putea spune. Desigur că eram considerat acolo, ca și el, o mumie, și două asemenea rămășițe din timpurile trecute erau pentru domnii moderni din Princeton prea mult. Ultima scrisoare a lui Einstein, datată 17 ianuarie 1955, este scrisă cu mașina și numai semnată de el. Ea este însoțită de copia unei scrisori către publicația „Reporter“, care se referă la atitudinea lui față de bomba atomică *. Nu m-am oprit mai amănunțit la aceste lucruri, care în scrisorile sale apar nu rareori, deoarece ele nu se potrivesc la această întrunire în mod plăcut solemnă. Dar din această ultimă scrisoare aș vrea totuși să redau cîteva fraze : „Scribii plătiți ai unei prese docile au încercat să slăbească impresia celor spuse de mine (o punere în gardă față de utilizarea abuzivă a științei), prezentînd lucrurile fie ca și cum eu aș fi regretat aspirațiile mele științifice, fie urmărind să creeze impresia că aș fi tratat profesiunile practice amintite ca fiind minore. Ceea ce voiam eu să spun era numai atît : în condițiile de astăzi, mi-aș alege numai o asemenea profesiune în care cîștigarea pîinii să nu aibă nimic comun cu năzuința spre cunoaștere“.

* Legatarul testamentar al lui Einstein, dl. O. Nathan de la New York, mi-a comunicat după lectura conferinței de față că în scrisoarea lui Einstein către „Reporter“ nu e vorba de bomba atomică, ci de încercările senatorului McCarthy de a înăbuși schimbul liber de opinii între oamenii de știință.

În curînd, prietenul muri. Soția mea posedă o scrisoare a fiicei sale vitrege Margot, care relatează ultima sa vizită la el : „Știi că eu am fost internată în același spital în care se afla Albert ? Am avut posibilitatea de a-l vedea și de a-i vorbi încă de două ori timp de cîteva ore. M-au dus la el în fotoliul meu de spital. La început nu l-am recunoscut, atît era de schimbat din cauza durerilor și a lipsei de sînge în obraz. Dar felul său de a fi era neschimbat. S-a bucurat că arăt ceva mai bine, a glumit cu mine și era pe deplin stăpîn pe situație ; vorbea cu o liniște adîncă — ba chiar cu un oarecare umor — despre medici, și își aștepta sfîrșitul ca pe un «eveniment al naturii» care urma să aibă loc. Pe cît de neînfricat fusese în viață, pe atît de liniștit și modest era în fața morții. Fără sentimentalism și fără regrete a plecat el din această lume“.

Sînt conștient de ceea ce înseamnă să fi fost prietenul său.

Sumar

Prefață	5
Cuvînt înainte	7
1. Introducere la <i>Teoria relativității a lui Einstein</i>	9
2. Mecanica cuantică și statistica	15
3. Despre importanța proceselor de ciocnire pentru înțelegerea mecanicii cuantice	26
4. Despre sensul teoriilor din fizică	30
5. Considerații filozofice cu privire la fizica modernă	55
6. Cauză, scop și economie în legile naturii (Principiile de minim ale fizicii)	80
7. Teoriile statistice ale lui Einstein	111
8. Fizică și metafizică	128
9. Situația conceptuală în fizică	146
10. Interpretarea mecanicii cuantice	170
11. Realitatea fizică	186
12. Este oare mecanica clasică într-adevăr deterministă ?	204
13. Amintiri astronomice	212
14. Interpretarea statistică a mecanicii cuantice	219
15. Fizică și relativitate	234
16. Dezvoltarea și natura secolului atomic	255
17. De Anul Nou 1955	271
18. Albert Einstein și cuantele de lumină	274
19. Amintiri despre Einstein	294
20. Din postfața cărții <i>The Restless Universe</i> (1951)	313
21. Simbol și realitate	320
22. Speranța ca toți oamenii să-și dea seama cît de mare este pericolul atomic	339
23. Privire retrospectivă asupra lucrărilor mele de dinamica rețelelor cristaline	350
24. Din corespondența lui Einstein cu Max și Hedwig Born	364

Redactor : IOANA GASPĂR
Tehnoredactor : FLORICA WEIDLE

*Colă editură : 21, 70 Colă de tipar : 23.75 Hirtie : tipar înalt
tip A 68 gr/m² Indici de clasificare secundară : pentru bibliotecile
mari : 53, pentru bibliotecile mici : 53*

Intreprinderea Poligrafică Informația str. Brezoianu nr. 23 - 25
Republica Socialistă România Comanda nr.97

Sumar

Prefață	5
Cuvînt înainte	7
1. Introducere la <i>Teoria relativității a lui Einstein</i>	9
2. Mecanica cuantică și statistica	15
3. Despre importanța proceselor de ciocnire pentru înțelegerea mecanicii cuantice	26
4. Despre sensul teoriilor din fizică	30
5. Considerații filozofice cu privire la fizica modernă	55
6. Cauză, scop și economie în legile naturii (Principiile de minim ale fizicii)	80
7. Teoriile statistice ale lui Einstein	111
8. Fizică și metafizică	128
9. Situația conceptuală în fizică	146
10. Interpretarea mecanicii cuantice	170
11. Realitatea fizică	186
12. Este oare mecanica clasică într-adevăr deterministă ?	204
13. Amintiri astronomice	212
14. Interpretarea statistică a mecanicii cuantice	219
15. Fizică și relativitate	234
16. Dezvoltarea și natura secolului atomic	255
17. De Anul Nou 1955	271
18. Albert Einstein și cuantele de lumină	274
19. Amintiri despre Einstein	294
20. Din postfața cărții <i>The Restless Universe</i> (1951)	313
21. Simbol și realitate	320
22. Speranța ca toți oamenii să-și dea seama cît de mare este pericolul atomic	339
23. Privire retrospectivă asupra lucrărilor mele de dinamica rețelelor cristaline	350
24. Din corespondența lui Einstein cu Max și Hedwig Born	364

Redactor : IOANA GASPARE
Tehnoredactor : FLORICA WEIDLE

*Colt editură : 21, 70 Colt de tipar : 23.75 Hirtie : tipar înalt
tip A 63 gr/m² Indici de clasificare sectională : pentru bibliotecile
mari : 63, pentru bibliotecile mici : 63*

Intreprinderea Poligrafică Informația str. Brezolanu nr. 23 - 25
Republica Socialistă România Comanda nr.97

E R A T A

<u>Pagina</u>	<u>trindul</u>	<u>in loc de:</u>	<u>se va citi:</u>
97	15 de jos	<i>Van de Waal</i>	<i>Van der Waals</i>
162	4 de jos	$L = mc^2 (1 - [1 - v^2/c^2]^{1/2})$	$L = mc^2 (1 - [1 - v^2/c^2]^{1/2})$
330	4 de jos	$1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{(n+1)}{2}$	$1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$

Max Born, Fizica în concepția generației mele

DIN CUPRINSUL LUCRĂRII:

Amintiri astronomice

Interpretarea statistică a mecanicii
cuantice

Fizică și relativitate

Dezvoltarea și natura secolului
atomic

De Anul Nou 1955

Albert Einstein și cuantele de
lumină

Amintiri despre Einstein

Din postfața cărții *The Restless
Universe (1951)*

Simbol și realitate

Speranța ca toți oamenii să-și dea
seama cât de mare este pericolul
atomic

Privire retrospectivă asupra lucră-
rilor mele din dinamica rețelelor
cristaline

Din corespondența lui Einstein cu
Max și Hedwig Born

Studii, articolele și expunerile incluse în acest volum aparțin marelui savant german, laureat al Premiului Nobel, Max Born, unul dintre fizicienii de frunte care au contribuit la promovarea marilor teorii ale secolului nostru. Ele prezintă acele răsturnări mărețe ce s-au petrecut în fizică în timpul activității de cercetător și profesor de aproape 50 de ani — precum și schimbarea concepției sale filozofice despre esența cunoașterii în fizică și despre importanța ei pentru omenire. Modul în care sînt tratate diferitele aspecte ale fizicii confirmă că pentru Max Born fizica nu constituie un scop în sine, ci prilej de reflecție filozofică, o cale de cunoaștere a Universului.

Luptător conștient și militant de seamă pentru triumful ideilor umaniste și pentru pace, Max Born dedică acestei lupte mai multe din articolele incluse în acest volum. Contemporan și prieten cu mari fizicieni ca : Einstein, Bohr, Planck, Heisenberg, Schrödinger, Pauli și alții, Born evocă întîlnirile sale cu ei, disputele avute cu acest prilej, oferind în felul acesta o adevărată panoramă a vieții științifice din anii 1921—1966.



EDITURA ȘTIINȚIFICĂ